

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Pajan

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Student:

Matija Pajan

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima koji su mi svojom pomoći i savjetima pomogli u izradi diplomskog rada. Prije svega asistentu Saši Kovačiću i mentoru profesoru Franji Cajneru na vremenu, materijalima i nesebičnoj podršci.

Također, zahvaljujem se obitelji, prijateljima i kolegama na strpljenju i potpori tijekom trajanja studija.

Matija Pajan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA PAJAN** Mat. br.: 0035182305

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA TOPLINSKI UMOR ALATNOG ČELIKA ZA TOPLI RAD**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THERMAL FATIGUE TESTING OF HOT WORK TOOL STEEL**

Opis zadatka:

Mehanizmi dotrajavanja koji utječu na vijek trajanja kalupa za tlačni lijev jesu: reakcijsko nataljivanje, toplinski umor, trošenje erozijom, abrazijom i adhezijom taline te korozija. Toplinski umor je dominantni mehanizam dotrajavanja kod takvih kalupa koji rezultira pojavom fine mreže pukotina na radnoj površini čime značajno utječe na trajnost kalupa i kvalitetu odljevaka. Primjenom postupaka inženjerstva površina moguće je stvaranje takvih površinskih slojeva koji bi mogli utjecati na produljenje trajnosti takvih kalupa.

Na osnovi literaturnih izvora u radu treba opisati pojavu toplinskog umora na kalupima za tlačni lijev i navesti površinske postupke modificiranja i prevlačenja kojima je moguće povišiti otpornost na toplinski umor.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti simulaciju toplinskog umora na alatnom čeliku za topli rad od kojega se izrađuju kalupi za tlačni lijev. Usporediti njegovu otpornost na toplinski umor nakon konvencionalne toplinske obrade i nakon plazmatskog nitriranja te PACVD prevlačenja dvjema prevlakama (TiCN i TiBN).

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. Metali za tlačno lijevanje	2
3. Eksploatacijski uvjeti rada i zahtjevi materijala kalupa tlačnog lijevanja	3
4. Mehanizmi dotrajanja kalupa za tlačni lijev.....	5
5. Toplinski umor	6
5.1 Temperaturni uvjeti tijekom tlačnog lijevanja	6
5.2 Pojava toplinskog umora.....	8
5.3 Temperaturni šokovi i koeficijenti otpornosti materijala na toplinski umor	12
5.3.1 Toplinska vodljivost.....	12
5.3.2 Koeficijent toplinskog širenja	12
5.3.3 Modul elastičnosti i čvrstoća.....	13
5.4 Utjecaj temperaturnih šokova na mikrostrukturu	13
5.5 Utjecaj tvrdoće na otpornost toplinskom umoru	14
6. Materijali kalupa za tlačni lijev	17
7. Postupci modifikiranja i prevlačenja kalupa za tlačni lijev	18
7.1 Postupci modifikiranja površine.....	19
7.1.1 Osnovna toplinska obrada kalupa za tlačni lijev	19
7.1.2 Plazma nitriranje (PN).....	22
7.2 Postupci prevlačenja.....	25
7.2.1 PACVD	26
7.2.2 Dupleks postupak (plazma nitriranje + prevlačenje).....	28
7.2.3 Višeslojne prevlake	31
8. Eksperimentalni dio.....	34
8.1 Ispitna oprema	35
8.2 Materijal i toplinske obrade uzoraka	39
8.2.1 Materijal	39
8.2.2 Toplinske obrade uzoraka	40

8.3 Ispitivanje tvrdoće nakon osnovne toplinske obrade	42
8.4 Ispitivanje prionjivosti.....	43
8.5 Debljina prevlaka	44
8.6 GDS Kemijska analiza površinskog sloja	46
8.7 Ispitivanje tvrdoće prevlaka	48
8.8 Ispitivanje faktora trenja pri temperaturama od 20 i 500 °C	49
8.9 Ispitivanje hrapavosti	54
9. Zaključak	57
10. Literatura	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Tipični primjeri odljevaka dobivenih tlačnim lijevom	1
Slika 2. Temperaturni tijek površine kalupa za vrijeme jednog ciklusa ulijevanja.....	6
Slika 3. Temperaturni profili pri različitim udaljenostima od površine kalupa za slučaj a) cijeli ciklus lijevanja b) u vremenu od 1s nakon ubrizgavanja taline	7
Slika 4. Toplinski umor površine kalupa za tlačno lijevanje	8
Slika 5. Mjesta pojavljivanja i izgled pukotina	9
Slika 6. Kronološka pojava pukotina uslijed toplinskog umora ovisno o broju ciklusa	10
Slika 7. Poprečni presjek pukotina toplinskog umora.....	10
Slika 8. Tvrdća površinskih slojeva	11
Slika 9. Mikrostruktura slojeva kalupa a) blizu površine b) 3 mm ispod površine.....	11
Slika 10. Poprečni presjek tipičnih pukotina toplinskog umora.....	14
Slika 11. Duljina dominantnih pukotina ovisno o broju ciklusa	16
Slika 12. Ukupna duljina pukotina ovisna o broju ciklusa.....	16
Slika 13. Pregled postupaka prevlačenja i modificiranja površine metala.....	18
Slika 14. Općeniti prikaz toplinske obrade za alatne čelike marke BÖHLER.....	21
Slika 15. Dijagram popuštanja za čelik BÖHLER W300	21
Slika 16. Izgled nitriranog sloja	22
Slika 17. Plazmatsko nitriranje.....	23
Slika 18. Usporedba sila izbacivanja odljevka.....	24
Slika 19. Postupci prevlačenja iz parne faze	25
Slika 20. Shema PACVD postupka prevlačenja kalupa.....	26
Slika 21. Postupci za povećanje broja ciklusa lijevanja	27
Slika 22. Mikrostruktura površinskog sloja kod duplex postupka	29
Slika 23. Ovisnost čvrstoće prevlake i faktora taloženja o naponu.....	30
Slika 24. Ovisnost čvrstoće prevlake i faktora taloženja o tlaku	30
Slika 25. Višeslojna prevlaka	31
Slika 26. Poprečni presjek jednoslojne prevlake i osnovnog materijala: (a) TiN, (b) TiC	31
Slika 27. Poprečni presjek (c) dvojslojne i (d) četveroslojne prevlake	32
Slika 28. Poprečni presjek prevlake sa: (d) šest i (e) deset slojeva	32
Slika 29. Ovisnost koeficijenta dinamičkog trenja prevlaka o udaljenosti ispitivanja.....	33
Slika 30. Shematski prikaz simulacije toplinskog umora	34
Slika 31. Temperaturni profil ispitivanja prema literaturi.....	35
Slika 32. Dimenzije uzoraka	36
Slika 33. Ispitna oprema.....	37
Slika 34. Uzorak A3	37
Slika 35. Uzorak u prihvatu uređaja.....	38
Slika 36. Sputtering metoda	38
Slika 37. TTT dijagram ispitnog čelika X38CrMoV5-3	39
Slika 38. Sučelje Rübig PACVD uređaja.....	41
Slika 39. Rezultati ispitivanja tvrdoće nakon osnovne toplinske obrade.....	42
Slika 40. HRC metoda ispitivanja prionjivosti prevlaka	43
Slika 41. Rezultati ispitivanja prionjivosti HRC metodom.....	44
Slika 42. Calotester	44
Slika 43. Princip rada Calotestera	45

Slika 44. GDS snimka nitrirane površine.....	46
Slika 45. GDS snimka nitrirane + TiCN površinske prevlake	47
Slika 46. GDS snimka nitrirane + TiBN površinske prevlake	48
Slika 47. Sumirani rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka.....	49
Slika 48. Ispitna oprema za određivanje faktora trenja.....	49
Slika 49. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A0... 50	50
Slika 50. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A1... 51	51
Slika 51. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A2... 52	52
Slika 52. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A3... 53	53
Slika 53. Površinska hrapavost uzorka A0.....	55
Slika 54. Površinska hrapavost uzorka A1	55
Slika 55. Površinska hrapavost uzorka A2.....	56
Slika 56. Površinska hrapavost uzorka A3.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najčešće korištene legure za tlačno lijevanje sa eutektičkim sastavom i eutektičkom temperaturom	3
Tablica 2. Kemijski sastav alatnog čelika za topli rad X40CrMoV 5-1	15
Tablica 3. Toplinske obrade	15
Tablica 4. Materijali kalupa za tlačni lijev	17
Tablica 5. Kemijski sastav (prosječni udio u %).....	19
Tablica 6. Parametri PACVD postupaka	28
Tablica 7. Rezultati ispitivanja prevlaka	33
Tablica 8. Kemijski sastav alatnog čelika X38CrMoV5-3	39
Tablica 9. Parametri toplinske obrade i prevlačenja	40
Tablica 10. Debljine prevlaka	45
Tablica 11. Srednja površinska hrapavost uzoraka	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Pa	Pascal	tlak
°C	Celzij	temperatura
Kg	kilogram	masa
HB	Brinell	tvrdća po Brinell-u
HRC	Rockwell	tvrdća po Rockwell-u
α	K^{-1}	koeficijent toplinskog širenja
λ	W/mK	toplinska vodljivost
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti
h	$W/(m^2 K)$	koeficijent prolaska topline

SAŽETAK

U radu je opisan toplinski umor kao mehanizam dotrajavanja kalupa za tlačno lijevanje koji uz djelovanje ostalih mehanizama dotrajavanja značajno skraćuje eksploatacijski vijek kalupa, što znači smanjenje efikasnosti procesa te visoke troškove proizvodnje. Opisani su postupci modificiranja površinskog sloja te postupci prevlačenja kojima je moguće znatno povišiti otpornost alatnog materijala na toplinski umor. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje svojstava prevlaka koje su postupkom PACVD nanešene na površinu uzoraka s ciljem povećanja otpornosti na toplinski umor. Prevlake TiN i TiBN te prethodnog kaljenja i plazmatskog nitriranja predlažu se za produljenje eksploatacijskog vijeka kalupa kod realnih procesa tlačnog lijevanja.

Ključne riječi: tlačno lijevanje, toplinski umor, prevlake

SUMMARY

The purpose of this paper is to describe the thermal fatigue as a mechanism of failure of the mold for die casting which, in combination with other failure mechanisms, shortens the life span of the mold. This results in decreased efficiency of processes as well as increased cost of production. The alteration of the outer layer and the process of hard coating are suggested as ways of increasing the resistance of the tools to thermal fatigue. For the empirical part of the paper, an experiment was conducted with the aim of uncovering the characteristics of the hard coating that offers maximum resistance to thermal fatigue when applied to the outer layer of the tested samples. According to the research results, TiN and TiBN hard coating and previous heat treatment, in addition to plasmatic nitriding, have proved to be the most efficient ways of expanding the life span of the mold involved in die casting.

Key words: Die casting, thermal fatigue, hard coating

1. UVOD

Tehnologija tlačnog lijevanja je proces proizvodnje odljevaka u kojem se rastaljeni metal (talina) ubrizgava u stalni kalup pod visokim tlakovima u rasponu od 10...400 MPa. Tlačnim ljevom moguće je lijevati odljevke različitih materijala, oblika i dimenzija sa eksploatacijskim svojstvima koja zadovoljavaju potrebne mehaničke i kemijske zahtjeve. Materijali koji se lijevaju tehnologijom tlačnog lijeva obično su legure na bazi aluminija, cinka, kositra, magnezija i bakra, dok se željezne legure lijevaju vrlo rijetko. Slika 1. prikazuje moguće oblike proizvoda tlačnog lijevanja. Tlak u kalupu održava sve do završetka skrućivanja i hlađenja odljevka unutar kalupne šupljine što predstavlja ciklička toplinska, kemijska i mehanička opterećenja kalupa. Ista opterećenja dovode do skraćenog eksploatacijskog vijeka trajanja kalupa što uzrokuje zastoje, poskupljenje procesa kao i završnog proizvoda. Mehanizmi dotrajavanja koji utječu na vijek trajanja kalupa za tlačni ljev su reakcijsko nataljivanje, toplinski umor, trošenje erozijom, abrazijom i adhezijom taline te korozija. Toplinski umor je dominantni mehanizam dotrajavanja te se u suvremenim postupcima tlačnog lijevanja ulažu napor sa svrhom produljenja eksploatacijskog vijeka trajanja kroz postupke modificiranja i/ili prevlačenja površine kalupa, što će kroz rad biti detaljnije razrađeno.



Slika 1. Tipični primjeri odljevaka dobivenih tlačnim ljevom [1]

U eksperimentalnom dijelu usporedit će se rezultati ispitivanja površinskih svojstava uzoraka od alatnog čelika za topli rad X38CrMoV5-3 nakon konvencionalne toplinske obrade, nakon plazmatskog nitriranja te PACVD prevlačenja TiCN i TiBN prevlakama. Ista ispitivanja imaju veliki značaj za realne procese tlačnog lijevanja jer će se ispitati koje kombinacije toplinske obrade i postupaka prevlačenja daju najbolje rezultate tj. pružaju optimalnu otpornost prema pojavi toplinskog umora kao dominantnog mehanizma dotrajavanja kalupa. Rezultati ispitivanja izneseni u točki 8. pokazat će značajnost i nužnost postupaka modificiranja i/ili prevlačenja površine kalupa što je i tema samog diplomskog rada.

2. Metali za tlačno lijevanje

Metal odljevka treba zadovoljiti širok spektar zahtjeva, od kozmetičkih do strukturnih, što ovisi o kemijskim svojstvima lijevanog metala. Ista svojstva su funkcija baznog metala, nečistoća, skrućivanja te naknadnih toplinskih obrada. Čisti metali rijetko se lijevaju zbog relativno loših mehaničkih svojstava, već se legiraju određenim legirnim elementima za poboljšanje mehaničkih i kemijskih svojstava.

Metali za tlačno lijevanje dijele se prema temperaturi tališta na:

- metale niskog tališta (do 400 °C) gdje spadaju legure na bazi cinka, olova i kositra
- metale visokog tališta (od 400 °C - 1000 °C) i to legure na bazi aluminijske, bakra i željeza

Konstrukcija uljevnog sustava kod stroja za tlačno lijevanje ovisi o temperaturama tališta metala, tako se metali niskog tališta lijevaju u kalupima za tlačno lijevanje s toplom komorom za ubrizgavanje, a metali visokog tališta lijevaju se u kalupima za tlačno lijevanje s hladnom komorom za ubrizgavanje. Vrijeme kontakta taline metala odljevka i dijelova uljevnog sustava kraće je kod kalupa s hladnom komorom što omogućava lijevanje talina visokih temperatura lijevanja. Masa odljevka uvelike ovisi o lijevanoj leguri, mase odljevaka kreću se od nekoliko grama do stotina kilograma.

Najčešće se lijevaju legure binarnog eutektičkog sastava koje su prikazane u Tablici 1. sa točnim eutektičkim sastavom i eutektičkom temperaturom.

Tablica 1. Najčešće korištene legure za tlačno lijevanje sa eutektičkim sastavom i eutektičkom temperaturom [2]

LEGURA:	Eutektički sastav	Eutektička temperatura (°C)
Al-Si	11.7% Si*	577
Al-Mg	35.0% Mg	450
Zn-Al	5.0% Al	382
Mg-Al	32.3% Al	437
Pb-Sb	11.2% Sb	252

3. Eksploatacijski uvjeti rada i zahtjevi materijala kalupa tlačnog lijevanja

Najčešće korišteni alatni čelici za rad u toplom stanju namijenjeni su za izradu alata koji se u radu zagrijevaju na temperature iznad 250 °C. Za vrijeme eksploatacije kalupi za tlačni lijev su izloženi brojnim mehaničkim i toplinskim utjecajima koji smanjuju vijek trajanja te dovode do kvarova i zastoja.

Uvjeta kojima su kalupi izloženi za vrijeme eksploatacije [3]:

- visoki radni tlakovi taline u kalupu
- visoka radna temperatura
- toplinski šokovi zbog velike razlike u temperaturi između površine, alati se još dodatno hlade vodom što pridonosi toplinskim šokovima
- kalupi moraju osigurati postojanost dimenzija zbog naglih toplinskih promjena
- abrazivno djelovanje taline zbog sadržaja neotopljenih konstituanata silicija ili već poluskrućenog stanja aluminijske legure
- adhezija koja se javlja zbog procesa zavarivanja krutih faza materijala kalupa i legure (stvaraju se intermetalni spojevi)
- toplinski umor površine i pojava mreže pukotina što može rezultirati zaglavljivanjem odljevka u kalupu i lošu površinsku kvalitetu

- zbog direktnog grijanja plamenicima za postizanje radne temperature materijali kalupa moraju biti vatrootporni
- zbog stalne izloženosti visokim temperaturama alatni materijali moraju biti otporni i naoksidaciju (tribokoroziju)

Iz eksploatacijskih uvjeta proizlaze zahtjevi koje materijal kalupa mora ispuniti [3]:

- otpornost prema trošenju kemijskim i fizikalnim utjecajima mlaza taline
- visok stupanj homogenosti i sposobnost poliranja kako bi se spriječilo lijepljenje odljevka i površine kalupa
- sposobnost za sve vrste obrada (deformiranje i odvajanje čestica)
- minimalna toplinska dilatacija za očuvanje dimenzijske točnosti
- otpornost na toplinske šokove i pucanje pri povišenim temperaturama
- otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama
- otpornost na popuštanje

4. Mehanizmi dotrajanja kalupa za tlačni lijev

Kalupi su za vrijeme tlačnog lijevanja izloženi mehaničkim i toplinskim naprezanjima koja, s obzirom na velikoserijsku količinu odljevaka, uzrokuju mehanizme dotrajanja koji utječu na kvalitetu lijevanja te na sam vijek trajanja kalupa. Cilj je prepoznati, a zatim spriječiti ili ublažiti utjecaje mehanizama dotrajanja da bi se dobila visoka proizvodnost i optimalna isplativost sustava tlačnog lijevanja.

Najznačajniji mehanizmi [3] koji se javljaju pojedinačno ili simultano, a utječu na vijek trajanja alata u eksploataciji su:

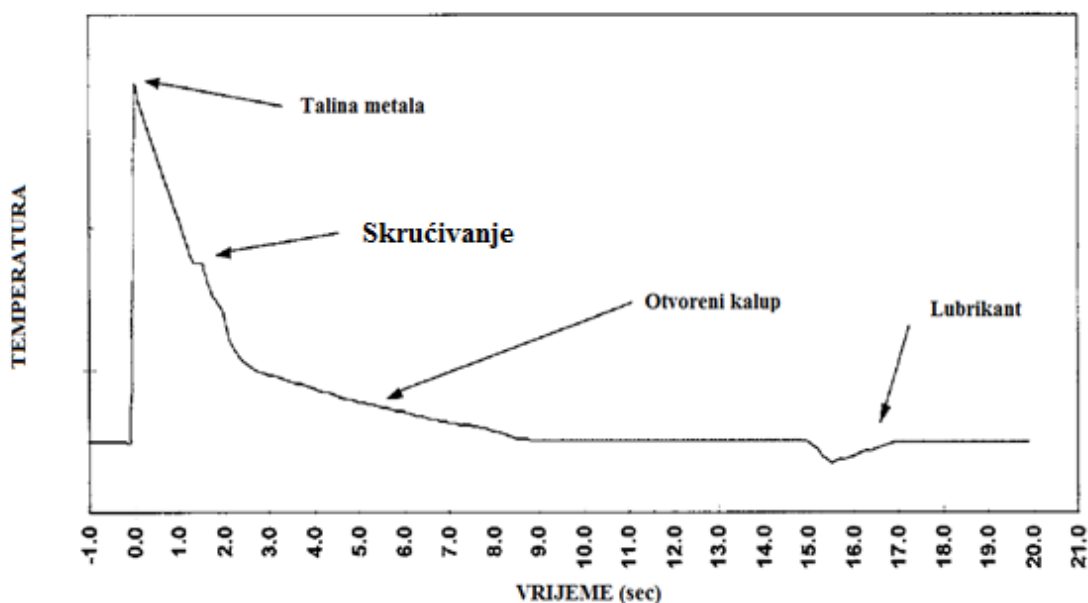
- toplinski umor
- reakcijsko nataljivanje
- abrazijsko trošenje
- adhezijsko trošenje
- erozijsko trošenje
- tribokorozijsko trošenje
- kavitacijsko trošenje

Svi mehanizmi trošenja ili dotrajanja kalupa, osim toplinskog umora površine, rezultiraju odstranjivanjem materijala od ukupnog volumena i mase kalupa. Odstranjivanje materijala se u pravilu indicira jednim, a nastavlja drugim mehanizmom trošenja. Utjecaji mehanizama dotrajanja mogu se ublažiti povišenjem otpornosti prema trošenju tj. povećanjem površinske tvrdoće.

5. Toplinski umor

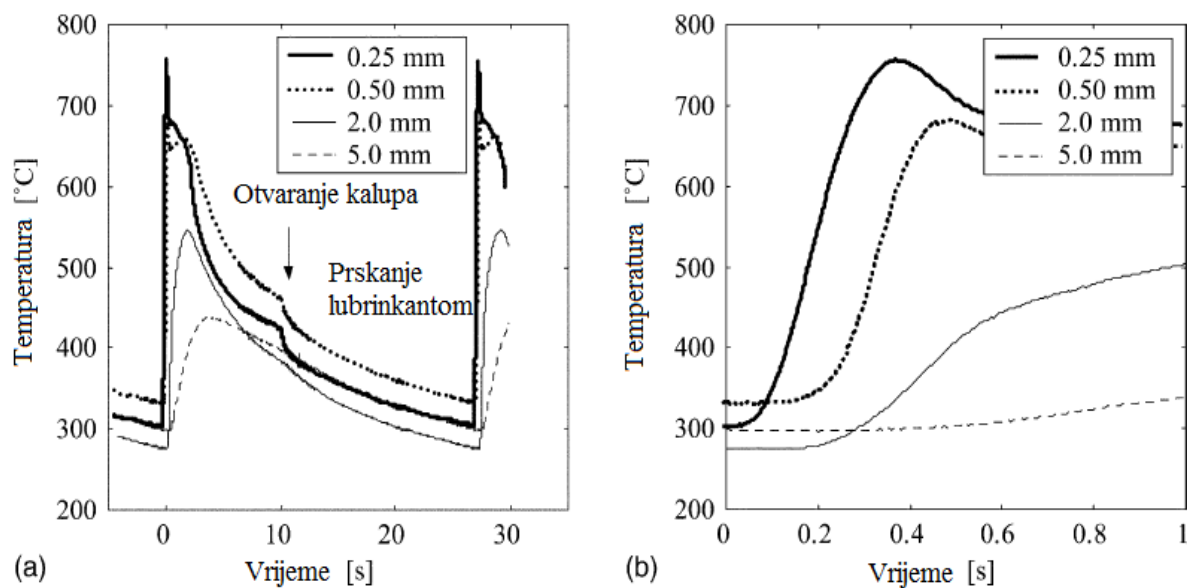
5.1 Temperaturni uvjeti tijekom tlačnog lijevanja

Sklop alata tj. kalupa za tlačno lijevanje u osnovi je isti kod tlačnog lijevanja s hladnom i toplom komorom za ubrizgavanje. Zadaća kalupa je, uz oblikovanje odljevka u kalupnoj šupljini, i odvođenje topline iz taline što dovodi do njenog skrućivanja i formiranja odljevka. Površina kalupne šupljine u dodiru sa talinom izložena je cikličkim toplinskim naprezanjima budući se talina ubrizgava pri visokim temperaturama (oko 700 °C), brzo hladi i skrućuje odvođenjem topline u ostatak kalupa veće toplinske inertnosti. Nerijetko su u sklopu kalupa izvedeni kanali za sredstvo za hlađenje koje ubrzava odvođenje topline. Prije svakog ciklusa ubrizgavanja, površina kalupne šupljine prska sa sredstvom za podmazivanje niže temperature što sprječava „zaljepljivanje“ odljevka i kalupa, ali i dovodi do većih temperaturnih šokova površine materijala kalupa. Slika 2. prikazuje temperaturni tijek površine kalupa za vrijeme jednog ciklusa ulijevanja.



Slika 2. Temperaturni tijek površine kalupa za vrijeme jednog ciklusa ulijevanja [4]

Slika 3. prikazuje različite temperature kalupnog materijala na različitim dubinama od površine u kontaktu s talinom u vremenu trajanja jednog ciklusa lijevanja mjedi. Vidljivo je da je razlika temperatura površinskog sloja do 300 °C, a s obzirom da se radi o istom materijalu, dolazi do različitih toplinskih naprezanja površinskih slojeva.

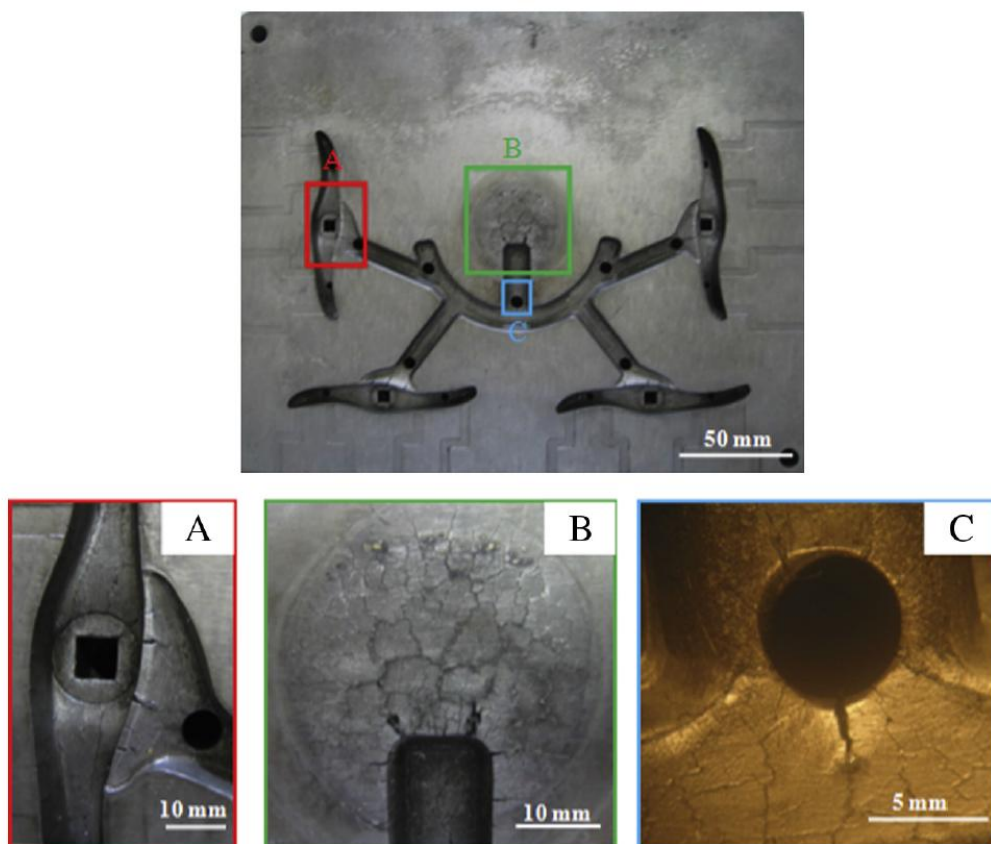


Slika 3. Temperaturni profili pri različitim udaljenostima od površine kalupa za slučaj a) cijeli ciklus lijevanja b) u vremenu od 1s nakon ubrizgavanja taline [5]

Određenim postupcima toplinske obrade te postupcima prevlačenja moguće je smanjiti temperaturnu razliku površinskih slojeva kalupa ili promijeniti mehanička svojstva materijala sa ciljem smanjenja naprezanja površinskih slojeva o čemu je više opisano u slijedećim točkama rada.

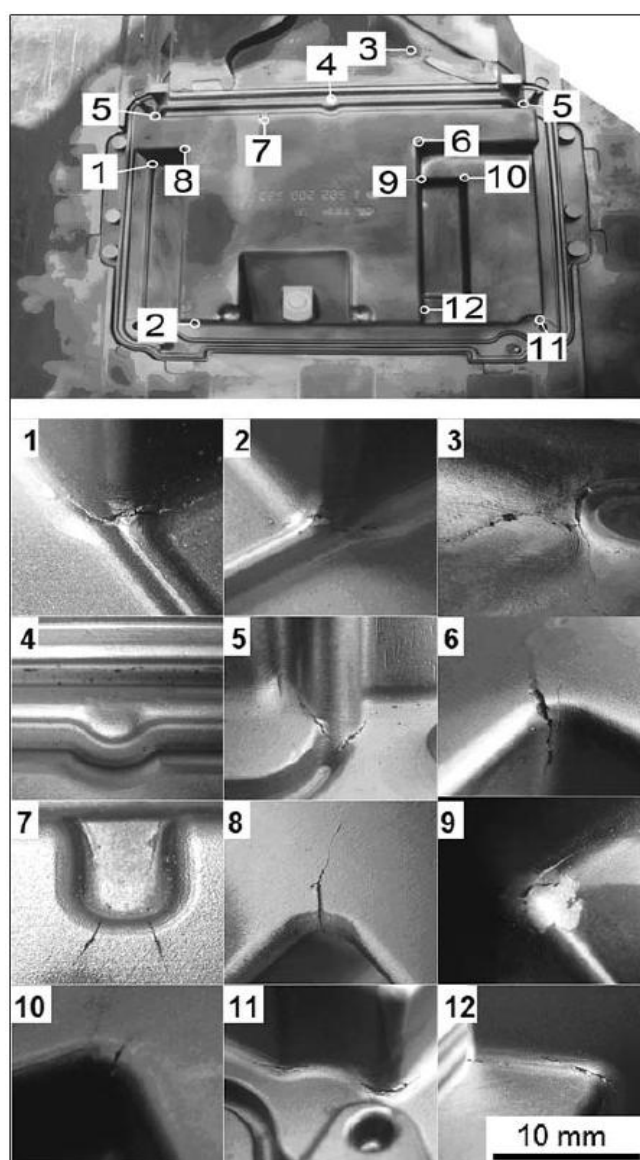
5.2 Pojava toplinskog umora

Toplinski umor jedan je od najutjecajnijih mehanizama dotrajavanja kalupa za tlačni lijev što smanjuje eksploatacijski vijek kalupa. Eksploatacijski vijek kalupa pri povišenim temperaturama lijevanja najčešće ovisi o svojstvima i otpornosti materijala kalupa na pojavu toplinskog umora. Toplinski umor manifestira se pojavom mreža pukotina, različitih dubina i površina, na površini kalupa te proizvodnjom površinski nekvalitetnih odljevaka. Dubina i broj pukotina s vremenom se povećavaju što dovodi do neupotrebljivosti kalupa kao najskupljeg sklopa stroja za tlačno lijevanje. Jezgra alata je zbog svoje toplinske inertnosti hladnija od radne površine što dovodi do različitih toplinskih širenja i naprezanja materijala kalupa. Ista naprezanja manja su od vrijednosti granice razvlačenja kalupnog materijala no nakon određenog broja ciklusa promjene temperature dolazi do umora materijala čija posljedica je upravo mreža površinskih pukotina. Slika 4. prikazuje izgled dotrajale površine dijela kalupa za tlačno lijevanje aluminijskog na kojem se vide pukotine nastale uslijed toplinskog umora materijala.

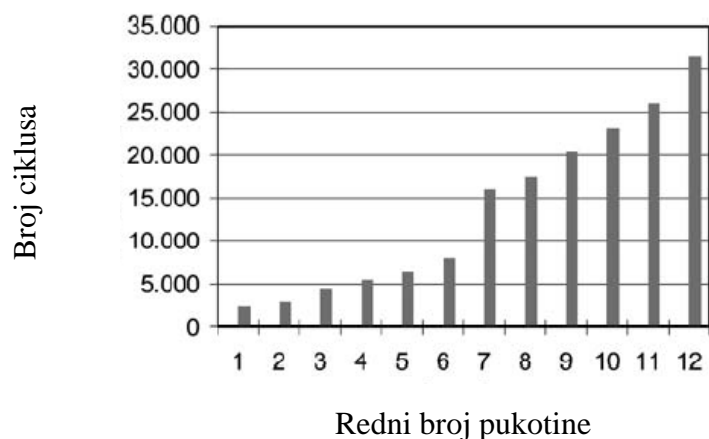


Slika 4. Toplinski umor površine kalupa za tlačno lijevanje [6]

Mjesta i vrijeme pojave pukotina ovise o geometriji i konstrukciji kalupa. Tako će se prve pukotine javiti na mjestima manjeg radijusa gdje su lokalne temperature više uslijed trenja i veće brzine taline. Pukotine koje se javljaju među prvima kroz daljnje cikluse lijevanja postaju sve većih dimenzija. Uslijed lokalnog povećanja temperature moguće je postići uvjete popuštanja čelika tj. smanjenje tvrdoće kalupa te smanjenje otpornosti na pojavu toplinskog umora te ostalih mehanizmima trošenja. Slika 5. povezuje mjesta pojavljivanja pukotina ovisno o broju ciklusa.



Slika 5. Mjesta pojavljivanja i izgled pukotina[7]

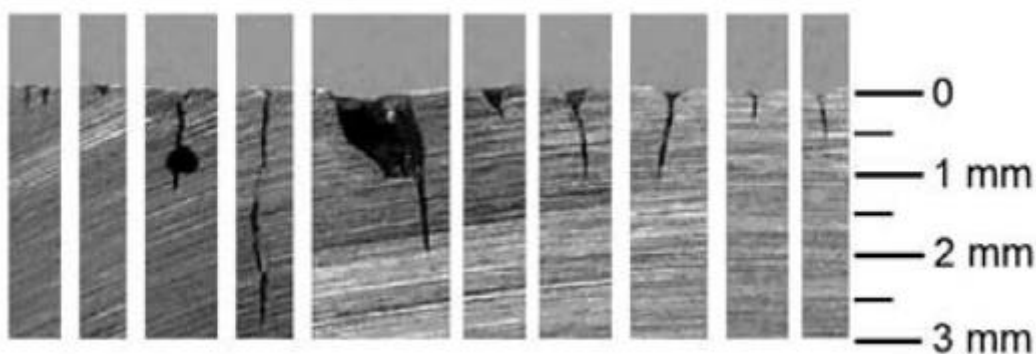


Slika 6. Kronološka pojava pukotina uslijed toplinskog umora ovisno o broju ciklusa [7]

Poprečni presjek kalupa prema Slici 7. pokazuje dubinu i broj pukotina jednog segmenta kalupa. Iste pukotine s vremenom propagiraju prema jezgri kalupa te mogu prouzročiti potpuni kvar kalupa pa i pucanje kalupa pod visokim tlakovima lijevanja što predstavlja opasnost za ljude i okolinu.

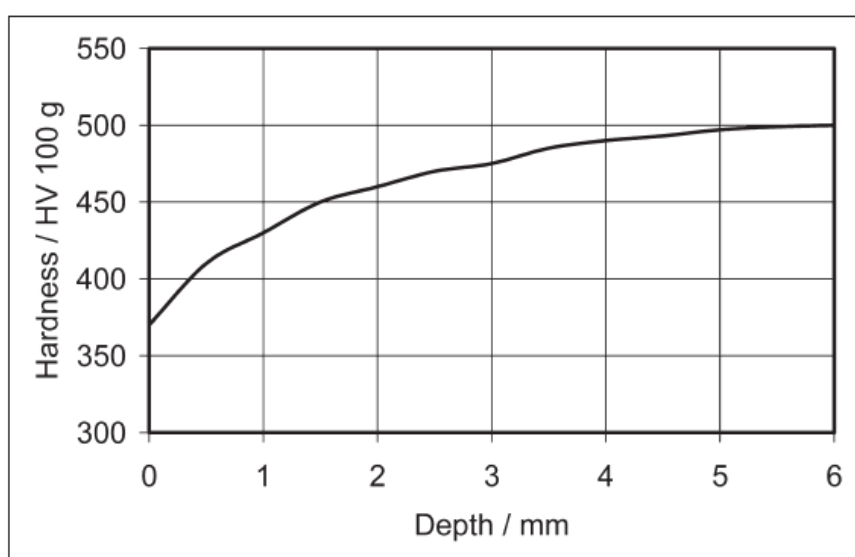
Općenito, oštećenja kalupa uzrokovana toplinskim umorom mogu se podijeliti na nekoliko razina:

- pojava pukotine na površini;
- produbljenje pukotine prema jezgri
- produbljenje manjih mreža pukotina
- povećanje dubine i širine mreža pukotina do potpunog kvara kalupa

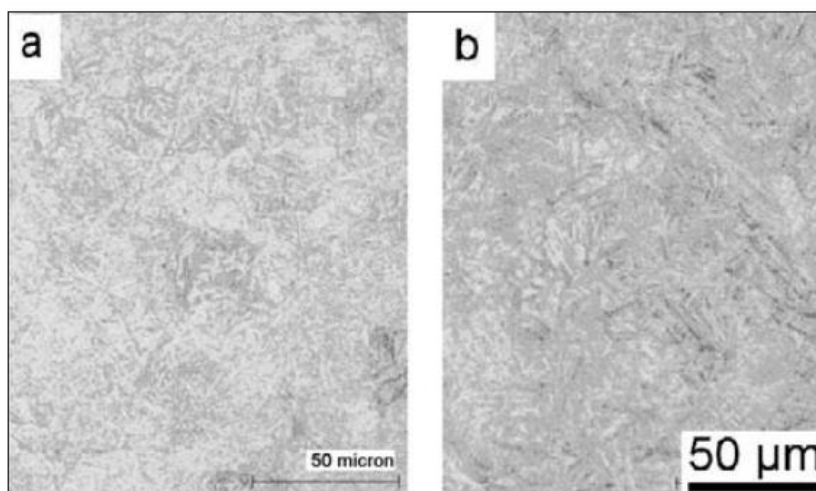


Slika 7. Poprečni presjek pukotina toplinskog umora [7]

Prema [7], na istom poprečnom presjeku obavljeno je mjerenje tvrdoće te se prema Slici 8. zaključuje da je došlo do popuštanja površinskog sloja kalupa, što se dokazalo i snimanjem mikrostrukture istog površinskog sloja prema Slici 9. Vidljivo je da je došlo do stvaranja martenzita popuštanja manje tvrdoće blizu površine, dok je veća koncentracija tvrdog martenzita prema jezgri kalupa [7]. Naime, popuštanje je neželjena pojava kod tlačnog lijevanja jer omogućava brži rast pukotina uslijed cikličkih toplinskih naprezanja, ali i pospješuje rad ostalih mehanizama dotrajavanja.



Slika 8. Tvrdoća površinskih slojeva [7]



Slika 9. Mikrostruktura slojeva kalupa a) blizu površine b) 3 mm ispod površine [7]

5.3 Temperaturni šokovi i koeficijenti otpornosti materijala na toplinski umor

Važna svojstva materijala za povišenu otpornost na toplinski umor su: koeficijent toplinskog širenja α , toplinska vodljivost λ , toplinska difuznost K , modul elastičnosti E , žilavost te koeficijent prolaska topline h . Prema faktorima rangiraju se svojstva prema zajedničkim karakteristikama na [8]:

- a) Toplinska svojstva materijala: koeficijent toplinskog širenja, specifična toplota i toplinska provodljivost
- b) Mehanička svojstva materijala: modul elastičnosti, žilavost
- c) Mikrostrukturalna stabilnost i otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama

5.3.1 Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost ili provodljivost je količina topline koju materijal provodi kroz jedinicu površine, u jedinici vremena, pri standardnim uvjetima, a da se pritom vrijednost temperature smanji za jedan stupanj na jedinici puta u smjeru strujanja topline. Znači da će viši koeficijent toplinske vodljivosti smanjiti temperaturnu razliku jezgre i površine, a samim time smanjit će i razliku naprezanja materijala kalupa koja dovodi do pojave pukotina toplinskog umora. Jedinica toplinske provodljivosti je W/mK i različita je za austenitne čelike tj. feritne čelike pri sniženim temperaturama dok se kod povišenih temperatura te vrijednosti izjednačavaju [8].

5.3.2 Koeficijent toplinskog širenja

Koeficijent linearnog toplinskog širenja je omjer promjene duljine promjenom temperature za jediničnu vrijednost (1K) u odnosu na početnu duljinu pri 273,15 K (0 °C). Koeficijent volumnog toplinskog širenja je tri puta veći od koeficijenta linearnog toplinskog širenja. Važan je faktor kod pojave toplinskog umora, naime, manji koeficijent toplinskog širenja uzrokuje manja naprezanja površinskog sloja i jezgre [8].

5.3.3 Modul elastičnosti i čvrstoća

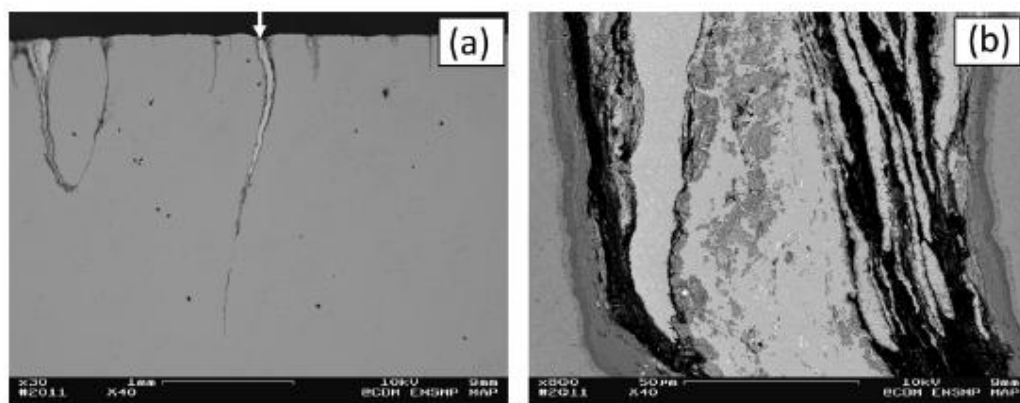
Modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i važno je svojstvo materijala kalupa, a jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linearnoj deformaciji. Važan je kod toplinskog naprezanja površine i jezgre, jer određuje naprezanja slojeva uzrokovane toplinskim deformacijama. Optimalna kombinacija svojstava materijala bila bi visoka čvrstoća i žilavost, no moguće je postići povišenu čvrstoću sa smanjenom vrijednošću žilavosti i obrnuto. Problem materijala kalupa je smanjena tvrdoća i čvrstoća pri povišenim temperaturama tzv. „hot hardness“, što smanjuje otpornost na toplinski umor. Toplinska naprezanja, povezana sa modulom elastičnosti, iako su ispod granice elastičnosti, nakon nekog vremena dovode do umora materijala i pojave pukotina.

5.4 Utjecaj temperaturnih šokova na mikrostrukturu

Izloženost povišenim temperaturama, cikličkim toplinskim napreznjima uzrokuje značajne promjena u mikrostrukturi materijala kalupa. Često dolazi do popuštanja površinskih slojeva što se lako može provjeriti mjerenjem tvrdoće poprečnog presjeka. Promjene mikrostrukture dovodi do smanjenja čvrstoće, tvrdoće što znači smanjena otpornost na mehanizme dotrajanja. Općenito, mikrostrukturna nestabilnost je pojava pri povišenim temperaturama koja se nikako ne smije dogoditi tijekom tlačnog lijevanja.

5.5 Utjecaj tvrdoće na otpornost toplinskom umoru

Uslijed cikličkih toplinskih naprezanja dolazi i do mikrostrukturnih promjena te do pada tvrdoće, čvrstoće, napredovanja inicijalnih pukotina pa čak i do loma kalupa. Uz oštećenja koja predstavljaju pukotine toplinskog umora dolazi i do ubrzane oksidacije površine te općenito do bržeg utjecaja rada mehanizama dotrajavanja. Isto tako moguće je stvaranje prema [9], površinskih slojeva bogatih kisikom, kromom i silicijem koji su visoke tvrdoće, ali male žilavosti što uzrokuje delaminaciju tj. odnošenja materijala kalupa uslijed tangencijalnih sila taline. Odošenjem materijala kalupa smanjuje se površinska kvaliteta odljevaka, dimenzijska točnost te općenito smanjenje kvalitete procesa. Općenito, prisutnost oksida u pukotinama toplinskog umora povećava naprezanja pri fazi skrućivanja (hlađenja kalupa). Povećanje naprezanja oko granice $R_{p0.2}$ uzrokuje brže napredovanje i rast pukotina. Slika 10. prikazuje poprečni presjek površine kalupa sa pukotinama toplinskog umora sa nehomogenim slojevitim oksidima te intermetalnim slojevima čije stvaranje značajno skraćuje radni vijek kalupa [9].



Slika 10. Poprečni presjek tipičnih pukotina toplinskog umora [9]

Iz gore navedenih razloga, potrebno je povisiti tvrdoću kaljenjem te naknadnim popuštanjem čime se povećava otpornost na toplinski umor. Uzrok veće otpornosti je povišena $R_{p0.2}$ te povišena žilavost pri povišenim temperaturama procesa [9]. Temperature popuštanja trebaju biti iznad temperatura odvijanja procesa da ne bi došlo do popuštanja, mikrostrukturnih promjena, pada tvrdoće i ostalih neželjenih pojava kod samog procesa.

Prema literaturi [9], eksperimentalna istraživanja prikazuju sve navedene uvjete za produljenje vijeka trajanja kalupa. Nad ispitnim uzorkom čelika za topli rad X40CrMoV 5-1 (AISI H13) kemijskog sastava prema Tablici 2. provedene su različite toplinske obrade prema Tablici 3.

Tablica 2. Kemijski sastav alatnog čelika za topli rad X40CrMoV 5-1 [9]

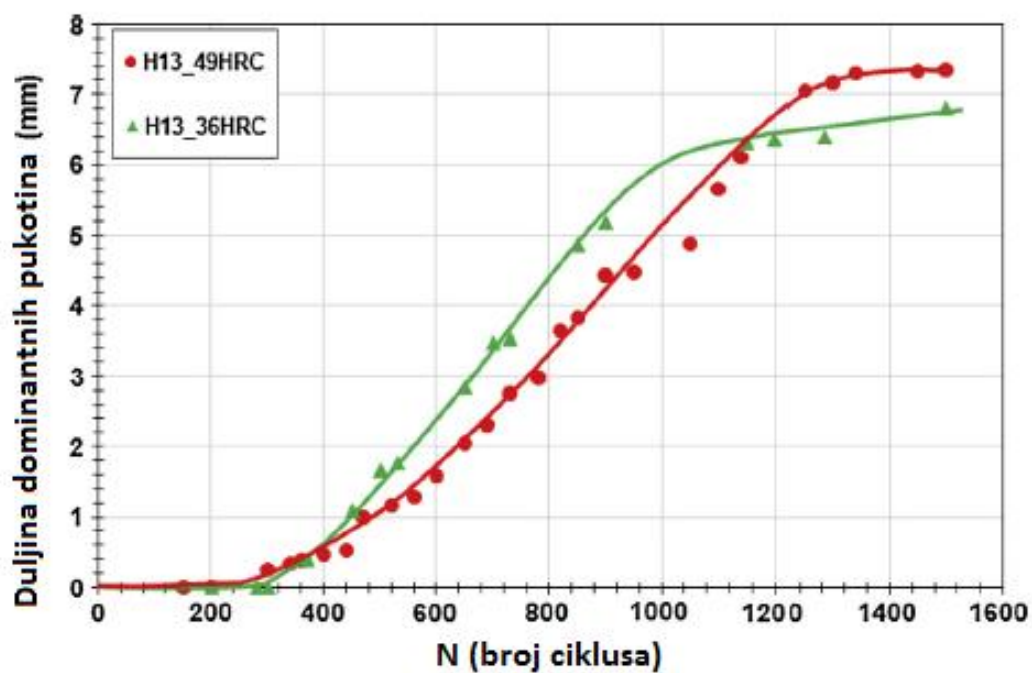
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	V
H13	0.35	1.32	0.288	0.012	0.0027	5.6	1.47	0	1.25

Tablica 3. Toplinske obrade [9]

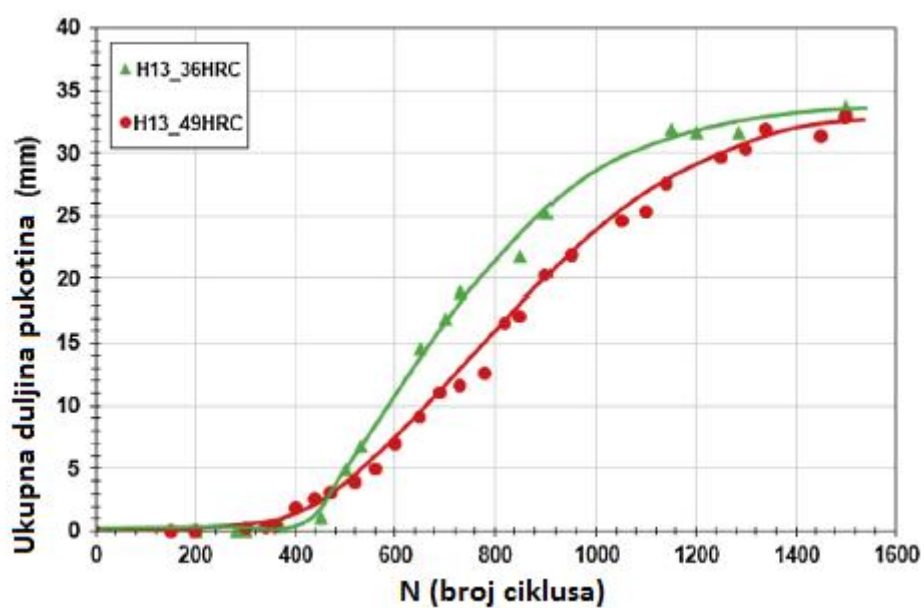
Čelik	Uzorak	T austenitizacije (°C)	1. popuštanje (°C)	2. popuštanje (°C)	Tvrdoća (HRC)
H13	H13_36	990/60 min/vacuo	544/90 min/vacuo	650/65 min/vacuo	36
H13	H13_49	990/60 min/vacuo	544/90 min/vacuo	595/65 min/vacuo	49

Mehanička svojstva materijala pri radnoj temperaturi pokazuju veću $R_{p0.2}$ uzorka H13_49 nego uzorka H13_36, što je posljedica veće postignute tvrdoće čime se dokazuje da je povišena tvrdoća jedan od ključnih faktora otpornosti na toplinski umor [9]. Koeficijent elastičnosti u ovom slučaju ne igra ključnu ulogu jer je skoro isti pri povišenoj temperaturi te su samim time i ciklička naprezanja uslijed dilatacije i skupljanja kalupa jednaka.

Isti ispitni uzorci podvrgnuti su cikličkim promjenama temperature čime se simulira toplinski umor te se prate vrijeme tj. broj ciklusa do pojave pukotina toplinskog umora. Nakon određenog broja ciklusa mjerene su duljine pukotina te dobiveni rezultati prema Slici 11. i 12. [9]. Ispitivanjem otpornosti na toplinski umor prikazano je da ukupna duljina pukotina kod uzorka manje tvrdoće veća pri manjem broju ciklusa od čelika više tvrdoće čime se direktno zaključuje da povišena tvrdoća čelika pruža veću otpornost na toplinski umor [9]. Kod odabira materijala važno je proučiti mehanička svojstva kod povišenih temperatura jer upravo ona određuju otpornost na umor i trajnost kalupa. Stabilnost svojstava pri povišenim temperaturama prikazuju alatni čelici za topli rad koji se i upotrebljavaju za izradu kalupa kod tlačnog lijevanja.



Slika 11. Duljina dominantnih pukotina ovisno o broju ciklusa [9]



Slika 12. Ukupna duljina pukotina ovisna o broju ciklusa [9]

6. Materijali kalupa za tlačni lijev

Kod izbora alatnog čelika za izradu kalupa za tlačno lijevanje treba uzeti u obzir toplinska i mehanička opterećenja kojima su izloženi dijelovi samog kalupa. Izbor čelika ovisi o leguri koja se lijeva, obliku i dimenzijama odljevka, trajnosti kalupa te o funkciji pojedinog dijela kalupa. Uz sve karakteristike odabranog sirovog čelika treba predvidjeti i mogućnost toplinske obrade i kompatibilnost s drugim postupcima kojima je cilj produljenje eksploatacijskog vijeka. Za izradu kalupa koriste se alatni čelici za rad u toplom stanju i to visokolegirani čelici s ~5% kroma (Cr) i 1-3% molibdena (Mo), (npr. X32CrMoV3-3, X38CrMoV5-1) te visokolegirani W-Cr-V čelici (npr. X30WCrV4-1, X30WCrV9-3). U Tablici 4. nalaze se preporučeni alatni čelici za izradu kalupa za tlačno lijevanje i njihov kemijski sastav. Karbidotvorci wolfram (W), molibden (Mo), vanadij (V), krom (Cr) povišuju otpornost na trošenje i popuštanje. Vanadij (V) ima utjecaja na povišenje tvrdoće u toplom stanju, a molibden (Mo), krom (Cr) i nikal (Ni) povišuju prokaljivost čelika. Kobalt (Co) povećava otpornost na popuštanje jer usporava difuziju ugljika (C) iz martenzitne rešetke prilikom povišenja temperature. Nikal (Ni) povišuje žilavost i prokaljivost, a siliciji (Si) i krom (Cr) pogoduju otpornosti na oksidaciju pri povišenim temperaturama. Zbog nižeg udjela ugljika (C) ovi čelici imaju dobru žilavost i otpornost na toplinski umor.

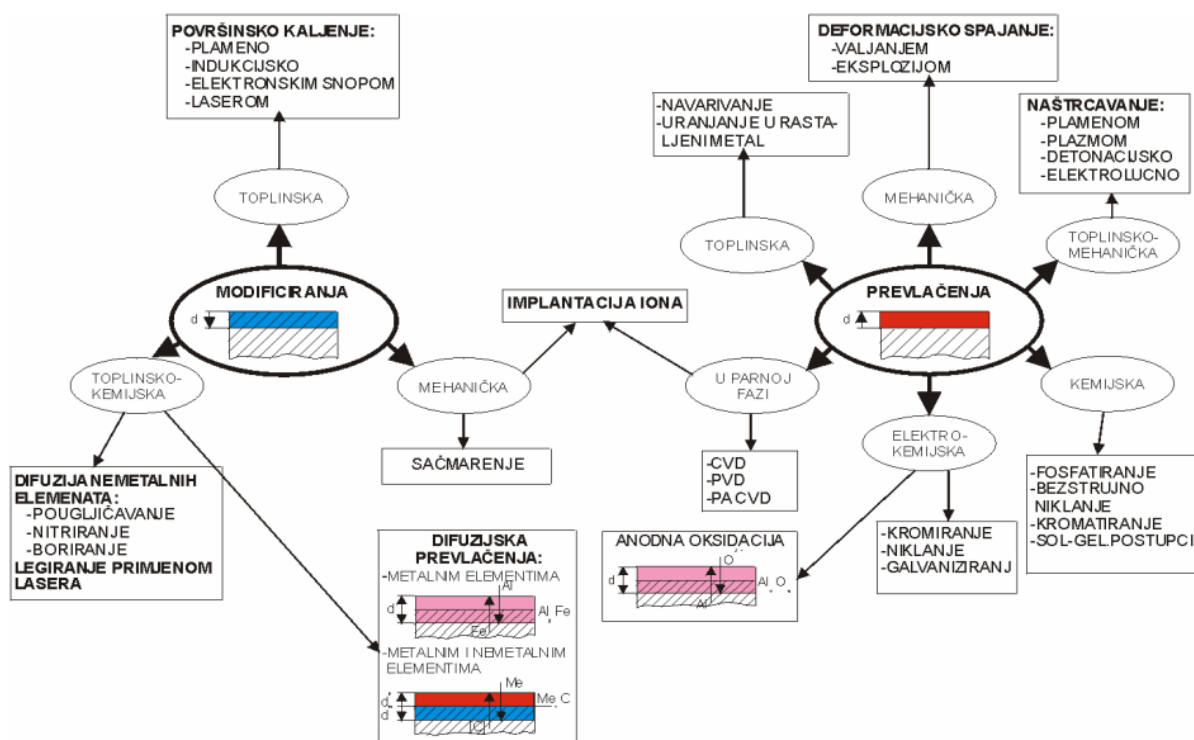
Tablica 4. Materijali kalupa za tlačni lijev [3]

Oznaka prema EN 10027-1	Oznaka prema AISI	Sastav u %							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V
X38CrMoV51	H11	0,38	1,0	0,4	5,0	-	-	1,3	0,3
X40CrMoV53	H13	0,4	1,0	0,4	5,0	-	-	1,3	1,0
X32CrMoV33	~H10	0,32	0,3	0,3	2,8	-	-	2,8	0,5
X30WCrV41	-	0,3	1,0	-	1,0	-	4,0	-	0,4
X30WCrV93	H20/H21	0,3	0,25	0,3	2,85	-	9,0	-	0,4
X30CrMoW51	-	0,37	0,9	0,6	4,8	-	1,4	1,5	0,2
56NiCrMoV7	-	0,55	-	-	1,1	1,7	-	0,5	0,1

Najvažnije svojstvo alatnih čelika za topli rad predstavlja otpornost na popuštanje. Otpornost na popuštanje obuhvaća pojave koje se mogu javiti tijekom izloženosti povišenim temperaturama (smanjenje tvrdoće, promjena mikrostrukture i toplinski umor).

7. Postupci modificiranja i prevlačenja kalupa za tlačni lijev

U današnje vrijeme postoji velik broj postupaka modificiranja i prevlačenja površina sistematiziranih na temelju fizikalnih i kemijskih osnova procesa. Osnovni cilj spomenutih postupaka je povišenje površinske tvrdoće što povećava otpornost na mehanizme trošenja. Određenim postupcima dodatno se povisuje korozijska postojanosti (npr. boriranje, nitiranje), otpornost na djelovanje povišenih temperatura (npr. vanadiranje, boriranje) te otpornost na kontaktne pritiske i dinamička izdržljivost (npr. indukcijsko kaljenje, cementiranje). Površinski sloj se može modificirati djelovanjem topline, mehaničkih djelovanjem ili toplinsko-kemijskim procesima. Slika 13. sistematski prikazuje postupke modificiranja i prevlačenja površine, dok će za potrebe rada najvažniji biti postupci kojima se postiže povećana otpornost na trošenje i povećava trajnost kalupa što pridonosi povećanju kvalitete odljevka i ekonomičnosti postupka tlačnog lijevanja.



Slika 13. Pregled postupaka prevlačenja i modificiranja površine metala [10]

7.1 Postupci modificiranja površine

Postupci modificiranja spadaju u postupke toplinske obrade kod kojih se mijenja samo mikrostruktura rubnog sloja, a kemijski sastav jezgre ostaje nepromijenjen. Cilj postupaka je poboljšanje određenih svojstava kao što su: otpornost na trošenje, mehanička otpornost, vatrootpornost, otpornost na koroziju itd. Modificiranje kemijskog sastava rubnog sloja ostvaruje se procesima difuzije metalnih i nemetalnih elemenata u aktivnim medijima koji mogu biti plinske, tekuće, čvrste ili ionizirane atmosfere. Neki od postupaka modificiranja difuzijom nemetalnih elemenata su: cementiranje (difuzija atoma ugljika u rubni sloj), nitriranje (difuzija atoma dušika u rubni sloj) te boriranje (predstavlja difuziju atoma bora u rubni sloj). Uz navede postupke postoje i mnogi drugi postupci, sa metalnim i nemetalnim difuzijskim elementima, a razlika je u parametrima procesa te postignutim svojstvima rubnog sloja u pogledu površinske tvrdoće, dubine difuzijskog sloja, dubine zone spojeva, te površinskim otpornostima. Postupci modificiranja najčešće se kombiniraju sa ostalim postupcima toplinske obrade kao što su: kaljenje, pougljičavanje i popuštanje. Alati tj. kalupi za tlačno lijevanje podvrgavaju se toplinskim postupcima modificiranja površine (rubnog sloja) sa ciljem povećanja površinske tvrdoće te otpornosti na mehanizme dotrajanja kojima su izloženi za vrijeme eksploatacije. To su najčešće postupci površinskog kaljenja, nitriranja te vanadiranja [3].

7.1.1 Osnovna toplinska obrada kalupa za tlačni lijev

Toplinska obrada kalupa za tlačni lijev slična je kod svih alatnih čelika koji se upotrebljavaju kod tlačnog lijevanja, dok će kao primjer biti obrađene toplinske obrade čelika standardnih oznaka HRN Č 4751/ EN 1.2343/ DIN X38CrMoV5-1, dok je trgovački naziv istog čelika BÖHLER W300.

Tablica 5. Kemijski sastav (prosječni udio u %) [11]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,38	1,10	0,40	5,0	1,30	0,40

Glavna svojstva:

BÖHLER W300 je vrsta čelika iz grupe legiranih alatnih čelika za rad u toplom stanju. Posjeduje visoku čvrstoću pri udarnim opterećenjima i visoku vlačnu čvrstoću na povišenim temperaturama.

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja

Čelik se zagrijava na 600 - 650 °C, zadržava na toj temperaturi (ovisno o volumenu i poprečnom presjeku uzorka) pa se polagano hladi u peći. Ovaj postupak se provodi u cilju smanjenja zaostalih naprezanja nastalih tijekom duge strojne obrade. Po završetku grijanja, slijedi držanje (uzorka) u neutralnoj atmosferi na nekoliko sati.

Kaljenje

Austenitizacija čelika provodi se držanjem na temperaturi austenitizacije od 1000 - 1040 °C, 15 - 30 minuta nakon izjednačavanja temperature, nakon čega slijedi gašenje čelika u različitim medijima: ulje, solna kupka, zrak i vakuum. Tvrdće koje se mogu postići ovim postupkom iznose:

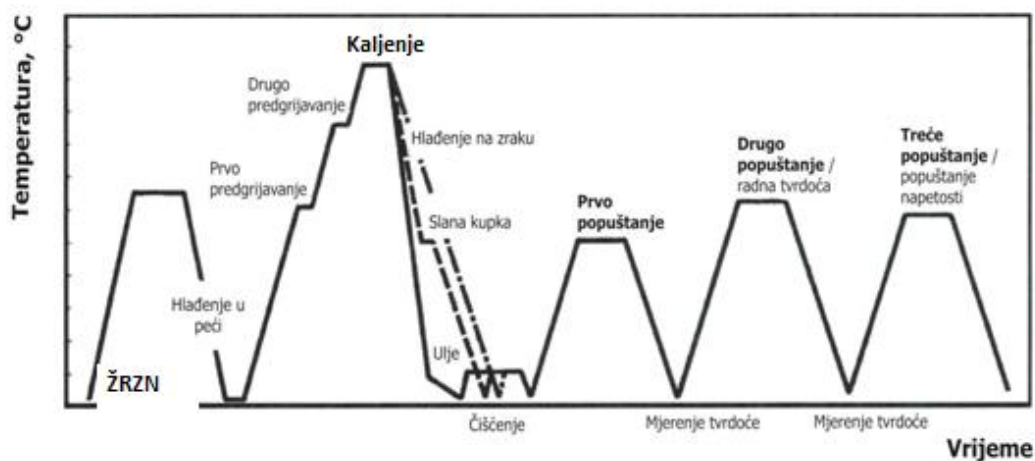
- 52 - 56 HRC u ulju ili solnoj kupki
- 50 - 54 HRC na zraku ili u vakuumu

Popuštanje

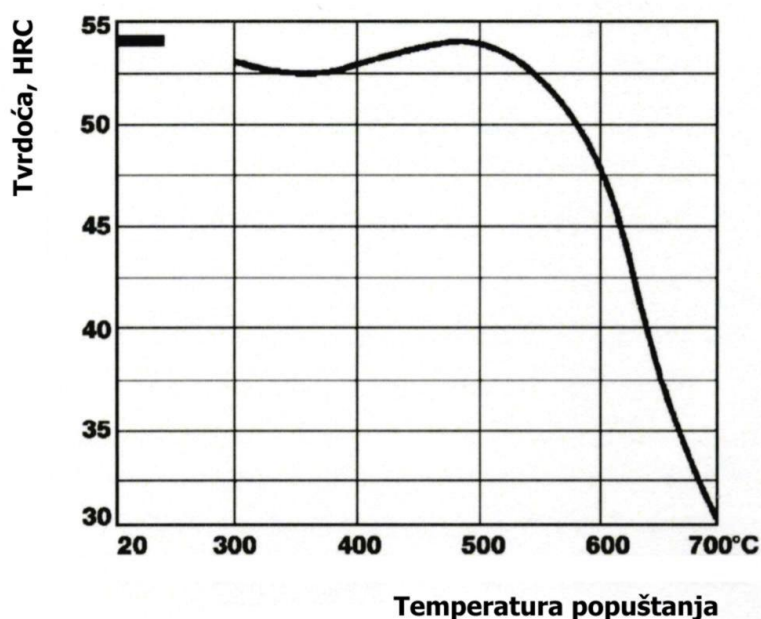
Toplinska obrada popuštanja izvodi se u tri slijeda:

- popuštanje I: grijanje na približno 30 °C iznad vrijednosti maksimalne sekundarne tvrdoće,
- popuštanje II: popuštanje do potrebne radne tvrdoće alata,
- popuštanje III: provoditi na temperaturi 30 - 50 °C ispod najviše temperature popuštanja u cilju smanjenja naprezanja

Toplinska obrade popuštanja provodi se zagrijavanjem na temperaturu popuštanja odmah nakon kaljenja. Vrijeme držanja u peći trebalo bi iznositi po 1 sat za svakih 20 mm debljine uzorka ali minimalno 2 sata. Hlađenje se provodi na zraku. Preporuča se provedba barem dva ciklusa popuštanja. Treći ciklus popuštanja koje se provodi u cilju popuštanja zaostalih naprezanja može dati dodatan pozitivan učinak na mehanička svojstva čelika. Općeniti prikaz toplinske obrade popuštanja za alatne čelike marke BÖHLER prikazuje Slika 14.



Slika 14. Općeniti prikaz toplinske obrade za alatne čelike marke BÖHLER [11]

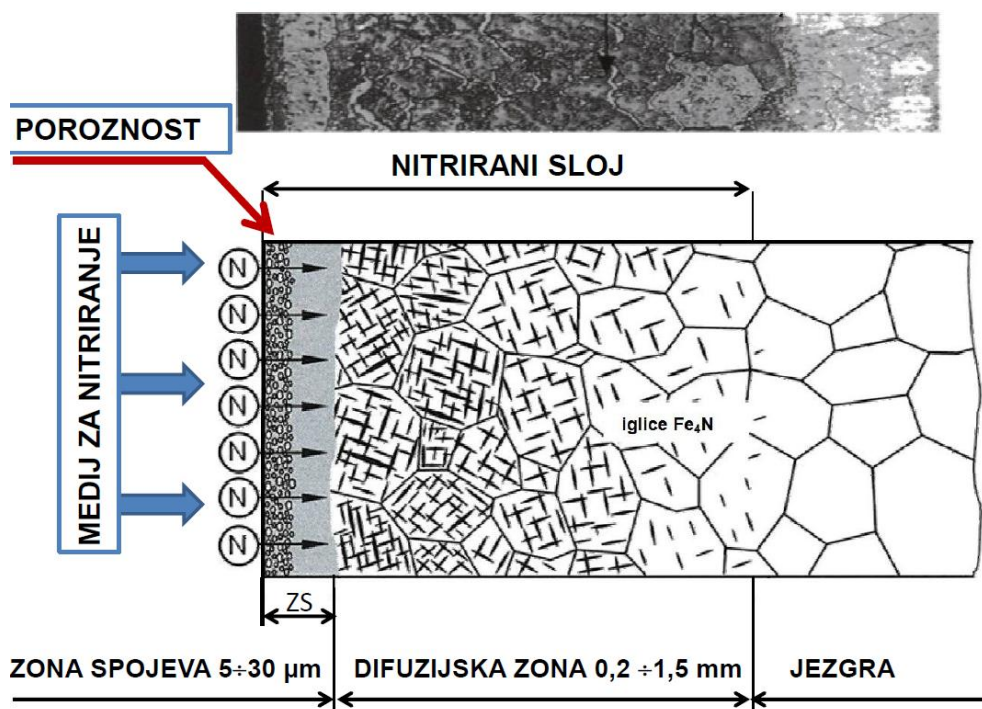


Slika 15. Dijagram popuštanja za čelik BÖHLER W300 [11]

Uz navedene toplinske obrade moguće su i naknadne toplinske obrade modificiranja mikrostrukture (svojstava) površinskog sloja materijala. U pravilu se svi kalupi nakon kaljenja podvrgavaju nekom od postupaka modificiranja i prevlačenja jer zakaljena površina predstavlja dobru bazu za daljnje postupke kojima se produljuje radni vijek kalupa.

7.1.2 Plazma nitiranje (PN)

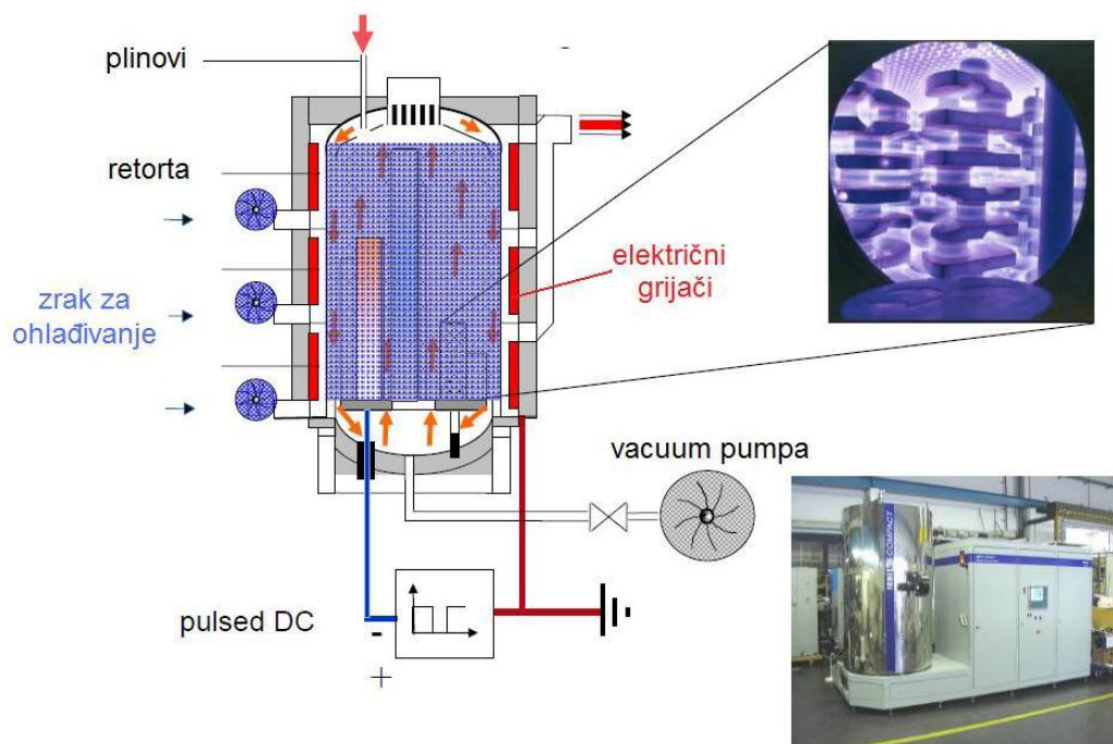
Nitriranje je postupak modificiranja rubnog sloja kalupa gdje atomi dušika difundiraju u osnovni materijal (čelik) te stvaraju, za nitriranje specifičan, rubni sloj koji sadrži zonu spojeva i difuzijsku zonu. Zona spojeva visoke je tvrdoće, a difuzijska zona preuzima moguća dinamička opterećenja. Upravo zbog tih karakteristika nitiranje je pogodan postupak za produljenje eksploatacijskog vijeka kalupa za tlačno lijevanje. Slika 16. prikazuje rubne slojeve kod izvršenog postupka nitiranja. Najvažnija prednost nitiranja u plazmatskoj atmosferi je snižena temperatura procesa. Naime, konvencionalni postupci odvijaju se na temperaturama oko 1000 °C, dok se plazma nitiranje odvija pri temperaturama oko 500 °C što predstavlja značajnu prednost odnosno stabilnost mikrostrukture osnovnog materijala.



Slika 16. Izgled nitiranog sloja [10]

Postupci nitiranja razlikuju se prema mediju u kojem se odvija difuzija atoma dušika u osnovni materijal te o temperaturama i trajanju procesa. Za nitriranje kalupa za tlačni ljev koriste se ionizirane (plazma) atmosfere jer je istim nitiranjem moguće postići samo difuzijsku zonu koja dobro podnosi dinamička opterećenja i osigurava vrlo dobru prionjivost tvrdih prevlaka na bazi titana (Ti(B,N) , TiB_2).

Plazma nitiranje (PN) postupak je koji slijedi nakon osnovne toplinske obrade kalupa te prethodi PACVD prevlačenju čime se postiže manji faktor trenja, visoka tvrdoća, a samim time povećava se otpornost na rad mehanizama trošenja.

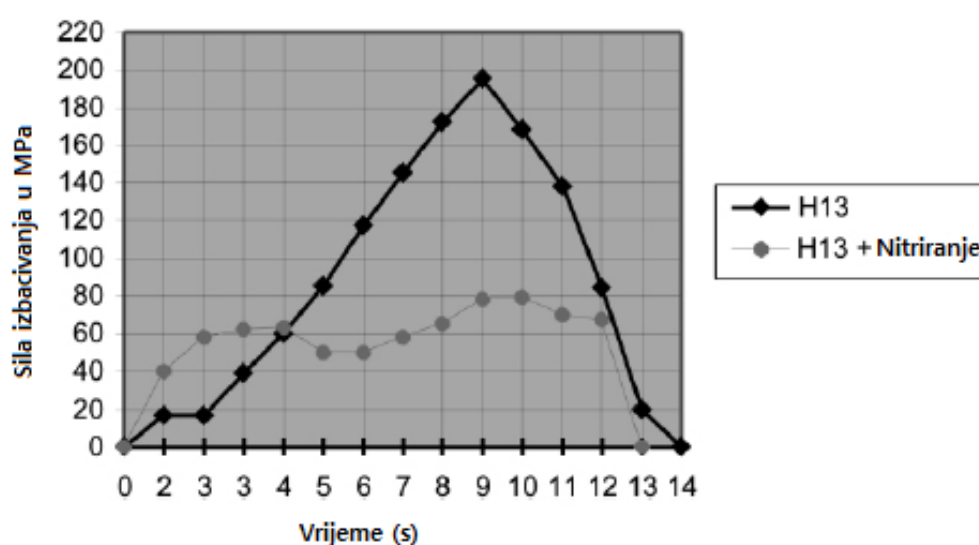


Slika 17. Plazmatsko nitiranje [10]

Prednosti i poboljšanja kod plazmatskog nitiranja alatnih čelika za izradu kalupa:

- relativno niska temperatura postupka (nema toplinskih naprezanja i deformacije kalupa)
- nema utjecaja na promjenu strukture materijala jezgre kalupa
- automatiziranost procesa plazma nitiranja
- postizive visoke površinske tvrdoće i otpornost trošenju (>1000 HV)
- rubni sloj je unatoč visokoj tvrdoći i duktilan
- smanjenjem adhezijskih sila kod nitiranja uzrokuje lakše odvajanje odljevka od površine kalupa i sprječava malformacije površina. Slika 18. prikazuje krivulja sile (u MPa) odvajanja odljevka od kalupa kod ne nitiranog čelika X40CrMoV5-3 (H 13) i istog

čelika nitrinog u ionskoj atmosferi. Primjećuje se značajno smanjenje sile odvajanja odljevka od površine nitriranog čelika nego kod obične nemodificirane površine kalupa. Razlog tome je što nitriranje sprječava stvaranje intermetalnih spojeva i smanjuje adhezijske sile materijala kalupa i taline (željezni nitridi na površini kalupa imaju manju kompatibilnost stvaranja intermetalnih spojeva sa materijalom taline)



Slika 18. Usporedba sile izbacivanja odljevka [12]

Nedostaci nitriranja alatnih čelika za izradu kalupa:

- skupa oprema i sredstva
- nemogućnost brušenja površine nakon nitriranja

7.2 Postupci prevlačenja

Postupci prevlačenja spadaju u postupke toplinske obrade kod kojih se na osnovni materijal (metal ili nemetal) nanosi tanak sloj (ili više njih) prevlaka na bazi oksida, karbida, nitrida itd. Debljine prevlaka variraju od 1-50 μm , a koriste se za povećavanje otpornosti na mehanizme trošenja (adhezija, abrazija) te u dekorativne svrhe. Za potrebe rada značajne će biti prevlake visoke tvrdoće za povećanje otpornosti na trošenje i povećanje trajnosti kalupa formirane iz parne faze. Postupci su sistematizirani na temelju temperatura izvođenja i mehanizmima prevlačenja. Na Slici 19. prikazani su postupci prevlačenja iz parne faze, temperature izvođenja te vrste prevlaka.

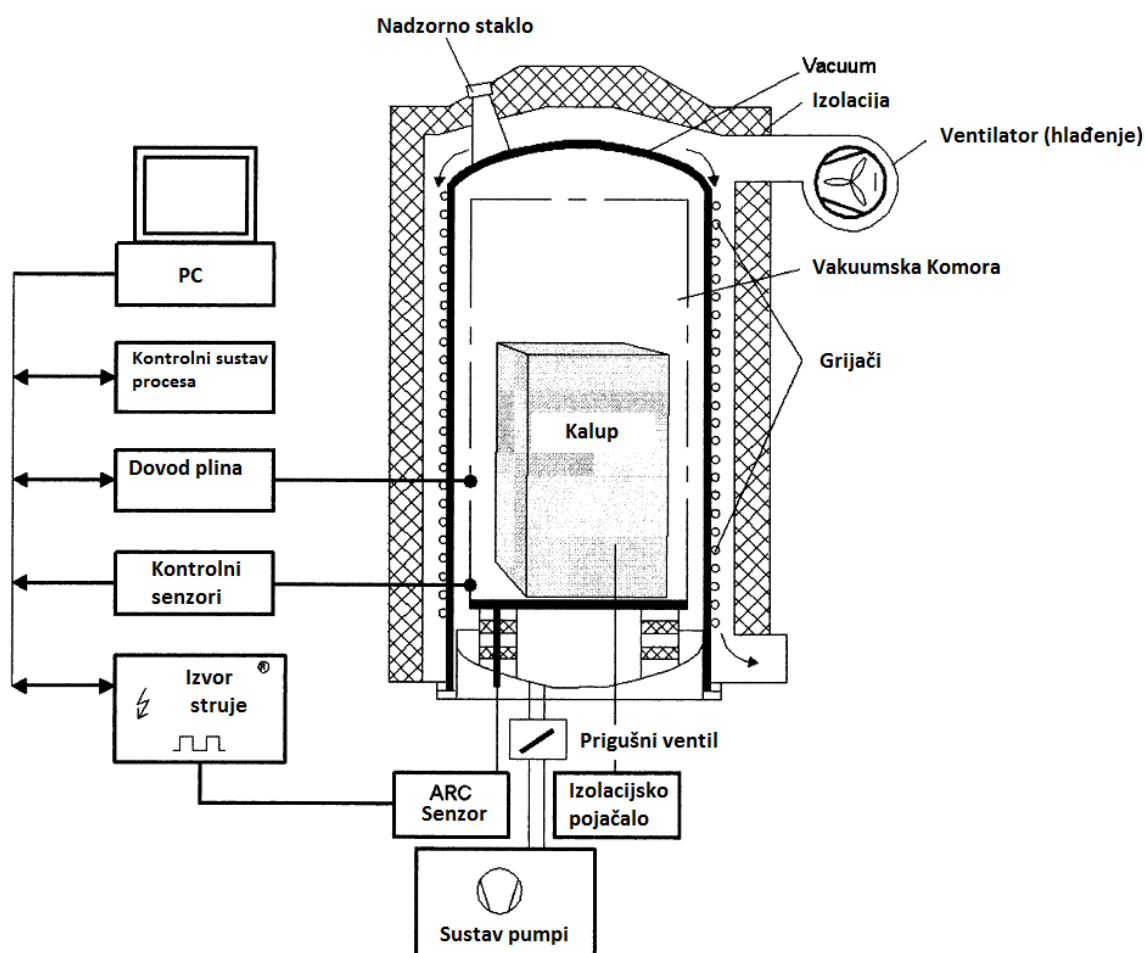
CVD (Chemical Vapour Deposition) postupci		PVD (Physical Vapour Deposition) postupci	
800 ÷ 1000 °C		200 ÷ 500 °C	
MTCVD (Medium Temperature CVD) 700 ÷ 900 °C			
PA CVD (Plasma Assisted CVD) ≈ 500 °C			
<div>Čelici (nakon kaljenja i popuštanja)</div> <div>Tvrdi metal</div>	Spojevi		
	Neoksidna keramika	<div>- karbidi: TiC, B₄C, SiC, ...</div> <div>- nitridi: TiN, TiAlN, CrN, ...</div> <div>- karbonitridi: TiCN, TiAlCN, ...</div>	<div>Čelici (nakon kaljenja i popuštanja)</div> <div>Tvrdi metal</div>
	Oksidna keramika	<div>- oksidi: Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, ...</div>	
	Metaloorganski spojevi	<div>- Me:CH (W₉₇C₃, ...)</div>	
	Dijamantu slični ugljik	<div>- DLC (Diamond like Carbide)</div>	
Svojstva: visoka tvrdoća, visoka otpornost trošenju (abraziji, adheziji, tribokoroziji) otpornost koroziji, dekorativni izgled			
Vrste prevlaka: jednoslojne, višeslojne, (nano slojevi, nanokompoziti), gradirane			

Slika 19. Postupci prevlačenja iz parne faze [3]

CVD i PVD postupci nisu pogodni za primjenu kod kalupa za tlačno lijevanje zbog velikih dimenzija i masa, gdje je potrebno zbog tzv. linije vidljivosti (line of sight) rotirati alat kod prevlačenja što predstavlja problem. Postupci CVD i PVD pogodniji su za primjenu prevlačenja alata manjih dimenzija kao što su rezni alati.

7.2.1 PACVD

PACVD postupkom (Slika 20.) prevučene površine sa prevlakama na bazi karbida (TiC , VC , W_2C , SiC , B_4C , Cr_7C_3), nitrida (TiN , ZrN , BN), karbonitrida ($\text{Ti}(\text{C,N})$) te keramički spojevi (Al_2O_3) pokazuju visoku tvrdoću, što znači veću otpornosti na sve mehanizme trošenje. Istim postupkom mogu se prevlačiti veliki i kompleksni kalupi čija se trajnost može značajno produžiti.



Slika 20. Shema PACVD postupka prevlačenja kalupa [13]

PACVD postupak najčešće je automatiziran i računalno upravljan. U inženjerskoj praksi koristi se vrlo često, dok će se za potrebe rada koristiti kod dupleks postupka za prevlačenje nitrirane površine kalupa za tlačno lijevanje aluminija i magnezija. Kako je spomenuto u točki 7.2.2 dupleks postupak znatno produžuje eksploatacijski vijek kalupa jer je površinski sloj kompaktan i otporan na mehanizme dotrajanja.

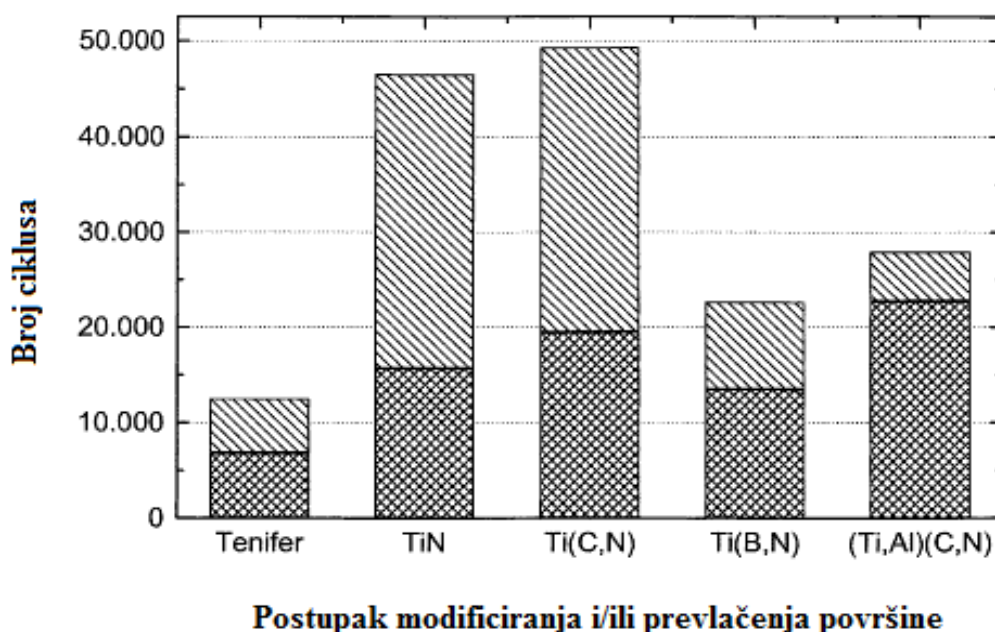
Kompaktnost površinskog sloja postiže se snažnim adhezijskim silama između željeznih nitrida (Fe_4N) i prevlaka na bazi titana (Ti(B,N) , TiB_2).

Prevlake PACVD postupka iste su kvalitete kao i prevlake CVD postupka iako su nanosene pri nižim temperaturama.

Prednosti PACVD postupka kod prevlačenja površine kalupa za tlačno lijevanje:

- čišćenje površine otparivanjem oksida i nečistoća u plazmi prije prevlačenja
- veća učinkovitost korištenja plinova i električne energije
- veća brzina nanašanja

Općenito postupci prevlačenja i/ili modifikacije potrebni su kod tlačnog lijevanja sa ciljem povećanja broja ciklusa lijevanja. Slika 21. grafički prikazuje postupke i prevlake za povećanje broja ciklusa koje kalup može „izdržati“ uz eksploatacijske uvjete rada prije potrebe popravka ili zamijene.



Slika 21. Postupci za povećanje broja ciklusa lijevanja [13]

Glavni nedostatak prevlačenja iz parne faze je visoka cijena opreme i sredstava.

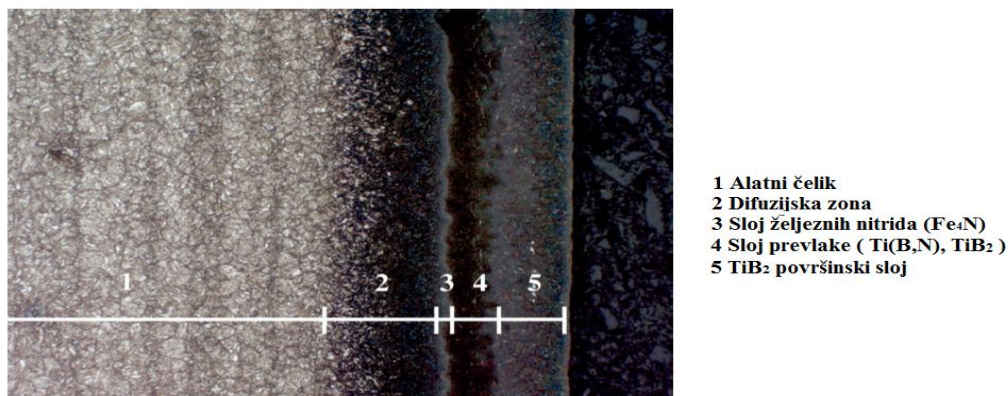
7.2.2 Dupleks postupak (plazma nitiranje + prevlačenje)

Dupleks postupak plazma nitiranja te naknadnog PACVD prevlačenje moguće je izvesti kontinuirano u istom uređaju i komori gdje odmah nakon nitiranja slijedi prevlačenje uz promjenu parametara ili diskontinuirano, gdje se svaki od postupaka izvodi na različitim uređajima tj. različitim reaktivnim komorama. U pravilu se uvijek provodi plazmatsko nitiranje prije prevlaćanja zbog dokazano bolje prionjivosti jer se plazmatskim nitiranjem eliminira stvaranje zone spojeva [10]. Parametri plazma nitiranja i PACVD prevlaćanja nalaze se u Tablici 6. Prednost je PACVD prevlaćanja, uz nanošenje tvrdih prevlaka i redukcija koncentracije kisika u slojevima prevlaka, jer prisutnost kisika smanjuje žilavost i udarni rad loma. Koncentracija kisika smanjuje se stvaranjem vakuumske atmosfere unutar komore za plazma nitiranje te PACVD prevlačenje.

Tablica 6. Parametri PACVD postupaka [14]

	PN	TiBN	TiB ₂	Grad.
Temperatura/ °C	400–550	530–590	530	500–590
Napon / V	500–600	550–700	450–500	450–700
Ciklus / μs/μs	0.75–0.88	0.5	0.75	0.5–0.9
Tlak / Pa	300–600	70–150	80–200	70–250
N ₂ / Vol%	10–80	11–33	–	11–33
TiCl ₄ / Vol%	–	0.5	1–2	0.5–2.5
BCl ₃ / Vol%	–	1–10	5–13	1–15
Ar / Vol%	0–20	16–21	7–9	0–21
H ₂ / Vol%	20–90	43–57	77–84	20–90
Trajanje / h	8–30	2	2–3	2–30

Nitiranje površine kalupa za tlačni lijev izvodi se sa ciljem povećanja otpornosti na dinamička opterećenja uslijed udara taline velikim brzinama, otpornosti na umor površine i ključni je postupak za produljenje trajnosti kalupa. Nanošenjem prevlaka ((Ti,Al)C,N) na nitirani sloj kalupa postiže se otpornost na toplinski umor uslijed cikličkih promjena temperature te otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama što dovodi do produljenja trajanja kalupa do 500 posto [14].

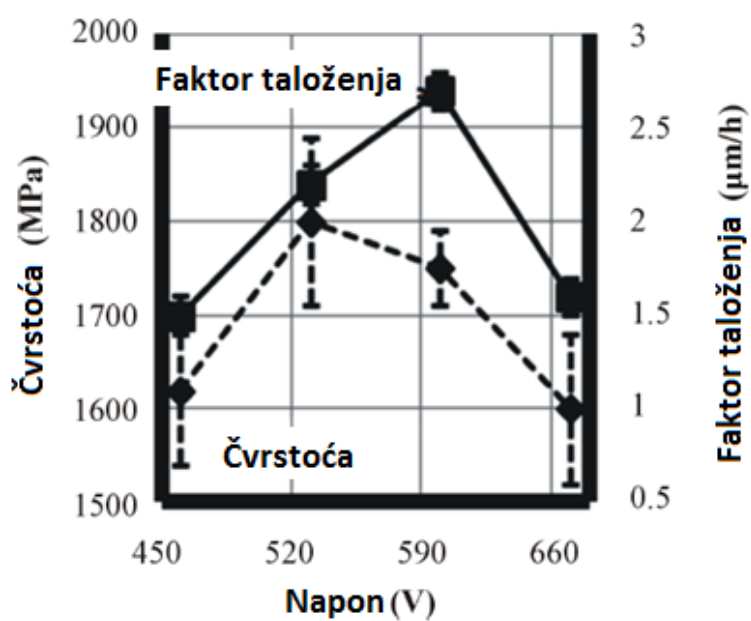


Slika 22. Mikrostruktura površinskog sloja kod duplex postupka [15]

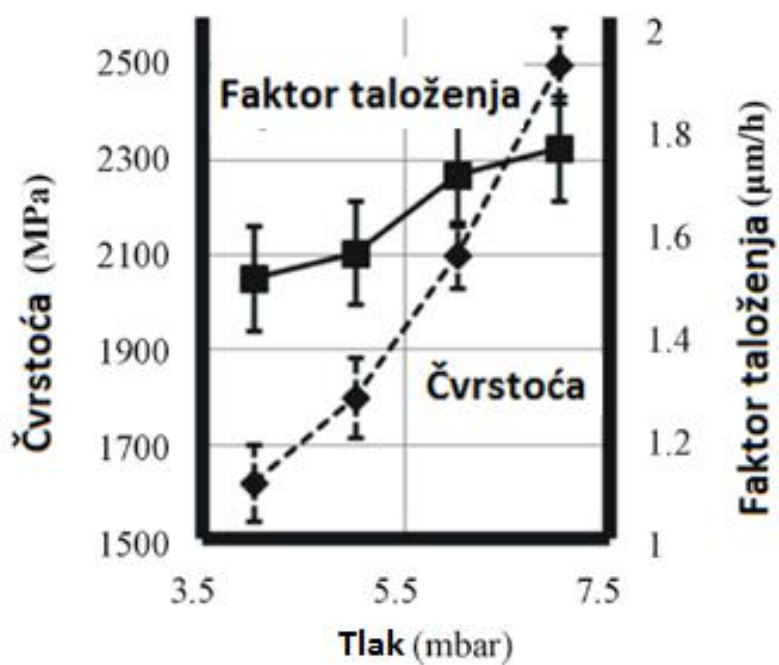
Ovisnost parametara prevlačenja o svojstvima prevlake

Nanotvrdoća prevlaka najviše ovisi o naponu plazmatske atmosfere unutar komore uređaja. Ista ovisnost može se objasniti preko energije kojom ioni „udaraju“ u površinu stvarajući prevlaku. Viši napon rezultira povišenom energijom iona plazme što znači stvaranje gušće i tvrđe prevlake. U slučaju prema Slici 23. rezultati prikazuju odnose između tvrdoće i faktora taloženja prevlake u odnosu na parametar napona plazme unutar komore uređaja. Vrijeme trajanja odvijanja procesa ovisi o traženim zahtjevima za tvrdoćom i debljinom prevlake. Tlak unutar komore isto tako važan je parametar za postizanje optimalne debljine i čvrstoće prevlake što je i vidljivo na Slici 24.

Povišenim podtlakom postiže se viši koeficijent taloženja i čvrstoća. Visoki podtlak povećava učinkovitost udara iona prevlake na površinu materijala što skraćuje vrijeme procesa, povećava gustoću i tvrdoću prevlake. Uz parametre napona i tlaka unutar komore važan je parametar protoka vodika u komoru, jer vodik reducira količinu kisika i klora unutar komore. Kisik i klor predstavljaju nečistoće unutar komore i prevlaka. Povećanjem koncentracije kisika i klora u prevlakama dolazi do pada kvalitete (nanotvrdoće nekoliko puta) prevlaka te je potrebno reducirati njihovu koncentraciju što se postiže povećanim protokom vodika u komoru. Ostale nečistoće koje se javljaju u slojevima je prisutnost ugljika koja se ne može izbjeći.



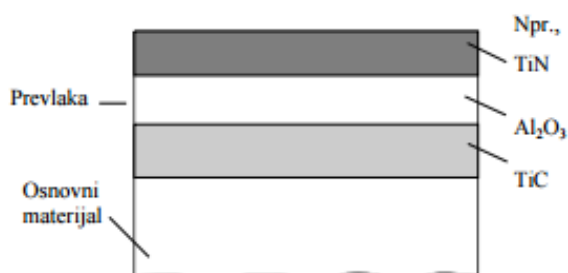
Slika 23. Ovisnost čvrstoće prevlake i faktora taloženja o naponu [14]



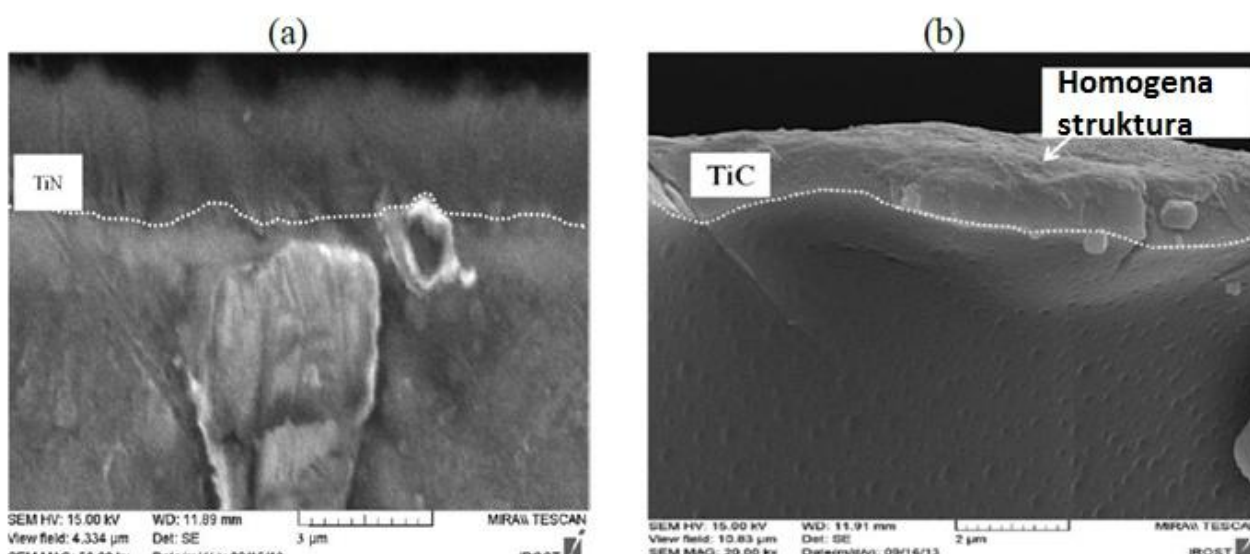
Slika 24. Ovisnost čvrstoće prevlake i faktora taloženja o tlaku [14]

7.2.3 Višeslojne prevlake

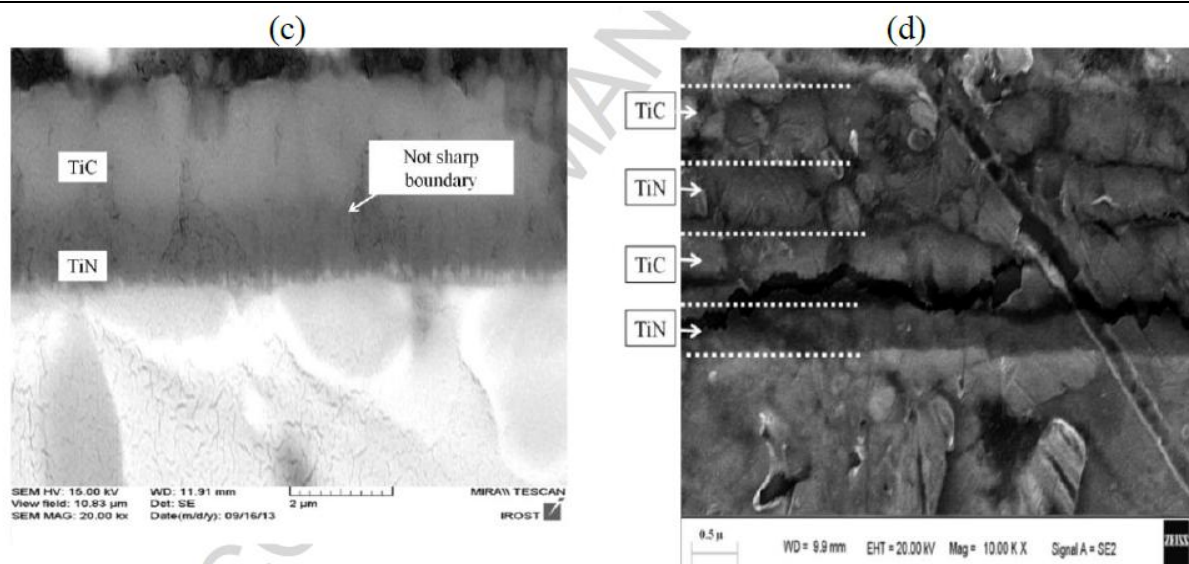
Višeslojne prevlake izvede se sa ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava u odnosu na jednoslojne prevlake. Poboljšanja se javljaju povećanjem ukupne tvrdoće, čvrstoće i žilavosti površinskog sloja te općenito posjeduju bolja mehanička i tribološka svojstva. Moguće su razne kombinacije višeslojnih prevlaka (što shematski prikazuje Slika 25.), no u strojarskoj primjeni tj. primjeni kod prevlačenja kalupa za tlačno lijevanje najčešće su prevlake TiN, TiC, TiBN čijim nizanjem jednoslojnih prevlaka nastaje višeslojna prevlaka sa optimalnim svojstvima pojedinih prevlaka. PACVD postupak optimalni je za provođenje višeslojnih prevlaka zbog mogućnosti postizanja visokog faktora taloženja te zadovoljavajućih svojstava pri nižim temperaturama.



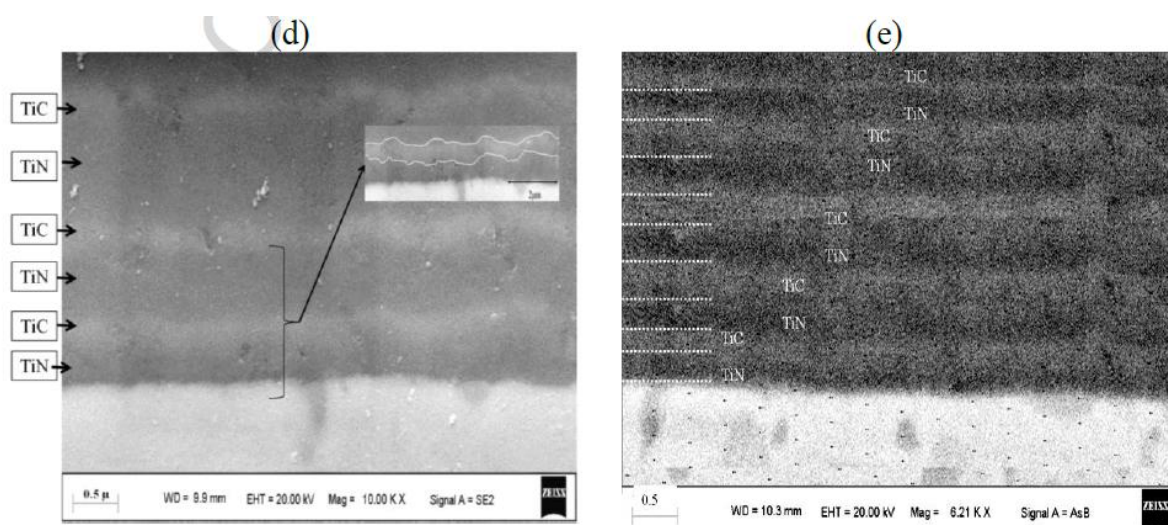
Slika 25. Višeslojna prevlaka [16]



Slika 26. Poprečni presjek jednoslojne prevlake i osnovnog materijala: (a) TiN, (b) TiC [17]



Slika 27. Poprečni presjek (c) dvojslojne i (d) četveroslojne prevlake [17]



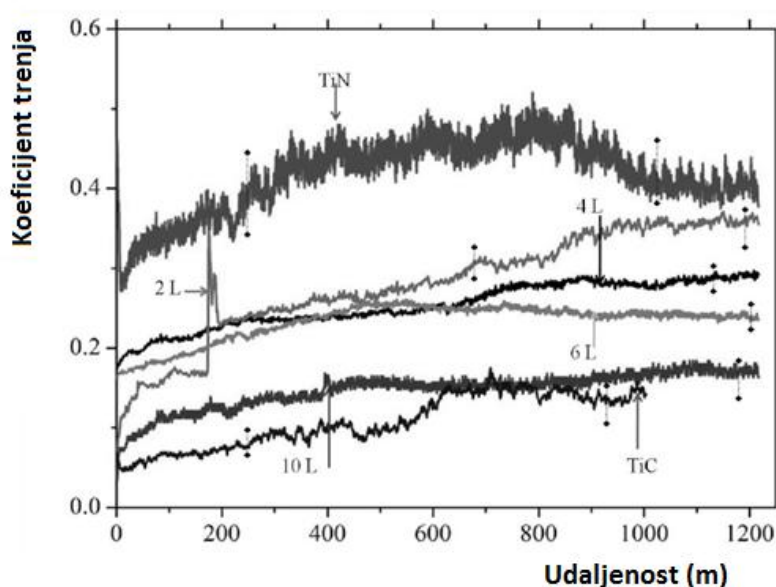
Slika 28. Poprečni presjek prevlake sa: (d) šest i (e) deset slojeva [17]

Povećanjem broja slojeva višeslojne prevlake povećava se ujednačenost slojeva čime se smanjuje koeficijent trenja te povećava površinska tvrdoća. Tablica 7. prikazuje rezultate istraživanja [17]. Ista svojstva predstavljaju i nameću se kao optimalni izbor za prevlačenje kalupa tlačnog lijevanja, jer se smanjuje utjecaj mehanizama dotrajavanja i povećava površinska kvaliteta odljevaka.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja prevlaka [17]

Prevlake	Debljina prevlaka (μm)	Mikrotvrdoća (GPa)	Faktor trošenja ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \times 10^{-3}$)	Koeficijent trenja	Žilavost $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
TiN	2-3	20.0 ± 1	6.67 ± 0.5	$0.40-0.50 \pm 0.05$	8.70
TiC	2-3	27.0 ± 1	3.26 ± 0.5	$0.10-0.12 \pm 0.05$	13.2
2 sloja	1	27.4 ± 1	4.60 ± 0.5	$0.20-0.35 \pm 0.07$	14.1
4 sloja	0.5-0.6	27.9 ± 1	1.10 ± 0.5	$0.20-0.30 \pm 0.04$	14.3
6 slojeva	0.33-0.5	28.5 ± 1	0.11 ± 0.5	$0.20-0.25 \pm 0.03$	14.5
10 slojeva	0.2-0.3	29.0 ± 1	0.05 ± 0.5	$0.10-0.20 \pm 0.05$	17.7

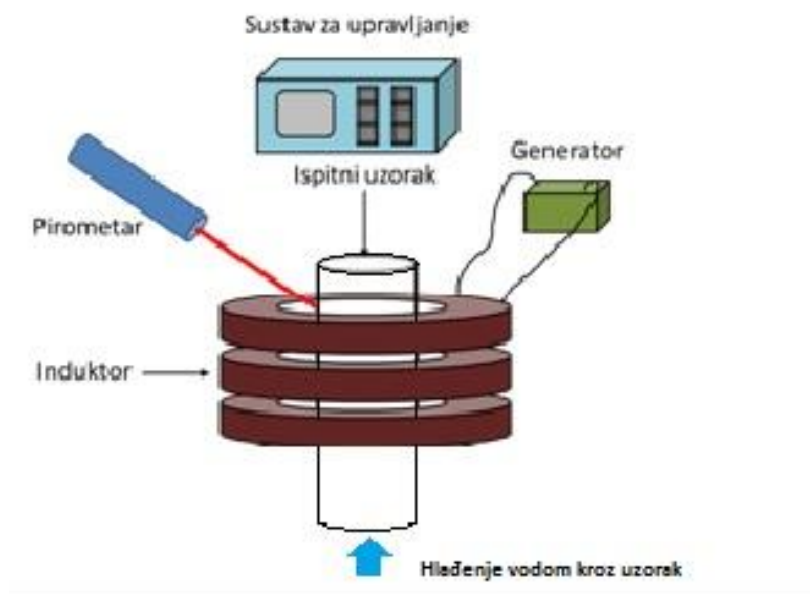
Rezultati ispitivanja [17] prema klasičnoj teoriji trenja, gdje se određuje dinamički koeficijent trenja (f) kao omjer sile trenja (F) i normalne sile (N), grafički su prikazani na Slici 29. Ispitivane su jednoslojne te višeslojne prevlake s različitim brojem slojeva te je vidljivo da veći broj prevlaka ima smanjeni koeficijent trenja u odnosu na prevlake s manjim brojem slojeva osim jednoslojne prevlake TiC [17]. Naime, uz tvrdoću važna svojstva za definiranje koeficijenta kontaktnog trenja su i površinska hrapavost, homogenost te žilavost površinskih slojeva.



Slika 29. Ovisnost koeficijenta dinamičkog trenja prevlaka o udaljenosti ispitivanja [17]

8. Eksperimentalni dio

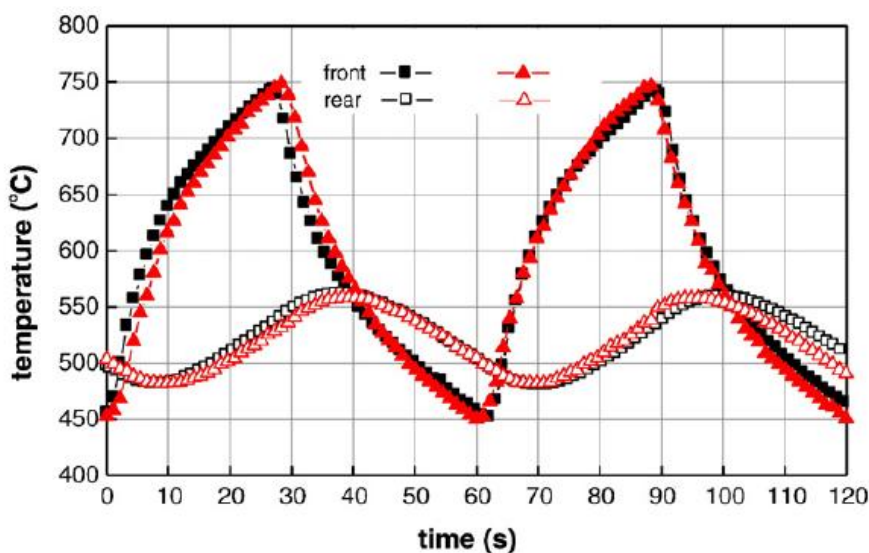
U ekperimentalnom dijelu rada se na uređaju za simulaciju toplinskog umora ispituju uzorci materijala kalupa za tlačno lijevanje na način da se ciklički induksijski zagrijevaju te hlade protokom vode kao što prikazuje Slika 30. Uzorci su napravljeni od materijala kalupa, alatnog čelika za topli rad X38CrMoV5-3 koji se uobičajeno koristi, no nad njima su nakon identične osnovne toplinske obrade provedeni različiti postupci modificiranja i prevlačenja površine. Na prvom uozrku provedena je konvencionalna toplinska obrada kaljenja i popuštanja, drugi je površinski nitritan u plazmatskoj atmosferi, dok su treći i četvrti pomoću PACVD postupka prevučeni TiCN i TiBN prevlakama. Cilj je odrediti broj ciklusa zagrijavanja i hlađenja te analiza površinskih slojeva tj. pukotina nastalih toplinskim umorom površine koja bi u realnim uvjetima predstavljala površinu kalupne šupljine kod tlačnog lijevanja. Odabrane granične vrijednosti temperatura (ugrijavanja i hlađenja) uobičajene su kod lijevanja aluminijskih legura. Cijeli sustav upravljan je preko PLC-a koji broji i upravlja ciklusima dok se preko pirometra ostvaruje povratna veza temperaturne petlje. Krajnji cilj ispitivanja je pronalaženje kombinacije toplinske obrade uzoraka te postupaka modificiranja i/ili prevlačenja koji izdrže najveći broj ciklusa bez pojave mreže pukotina nastalih toplinskim umorom.



Slika 30. Shematski prikaz simulacije toplinskog umora

8.1 Ispitna oprema

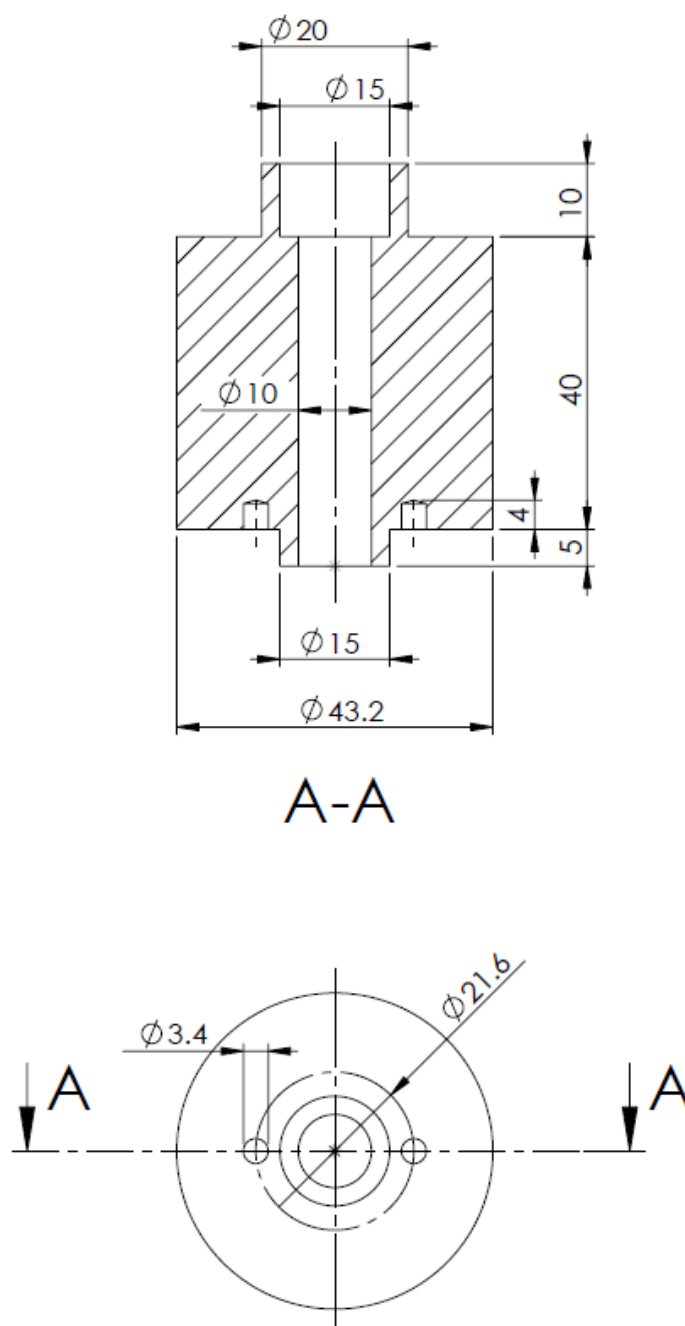
Prema dostupnim literaturnim izvorima [18] ispitivanja otpornosti na toplinski umor, temperaturni profil (Slika 31.) pokazuje znatno brže hlađenje od onog u realnim procesima (temperaturni profil realnog procesa prikazuje Slika 3.) te se na taj način pravilno ne simuliraju realni uvjeti zagrijavanja i hlađenja površine kalupa. Razlog je provođenje grijanja otvorenim plamenom te direktno hlađenje površine vodom ili zrakom čime se ne dobiva temperaturni profil sličan onome stvarnog procesa.



Slika 31. Temperaturni profil ispitivanja prema literaturi [18]

Ispitna oprema (Slika 33.) na kojoj smo proveli simulaciju toplinskog umora konstruirana je tako da se hlađenje odvija kroz šuplji uzorak prema vanjskoj grijanoj površini čime se ostvaruje sporije hlađenje sličnije hlađenju površine kakvo se odvija kod skrućivanja legura. Druga prednost našeg ispitivanja je bezkontaktno ugrijavanje površine induktorom, bolja regulacija ugrijavanja (brzina ugrijavanja, dubina ugrijanog sloja). Vođenje sustavom i upravljanje simulacijom toplinskog umora odvija se putem PLC-a koji povezuje pirometar i indukcijski generator u jednu cijelinu i na temelju dobivenih podataka iz pirometra upravlja izlaznom snagom indukcijskog generatora, odnosno regulira (održava) temperaturu i brzinu ugrijavanja ispitnog uzorka.

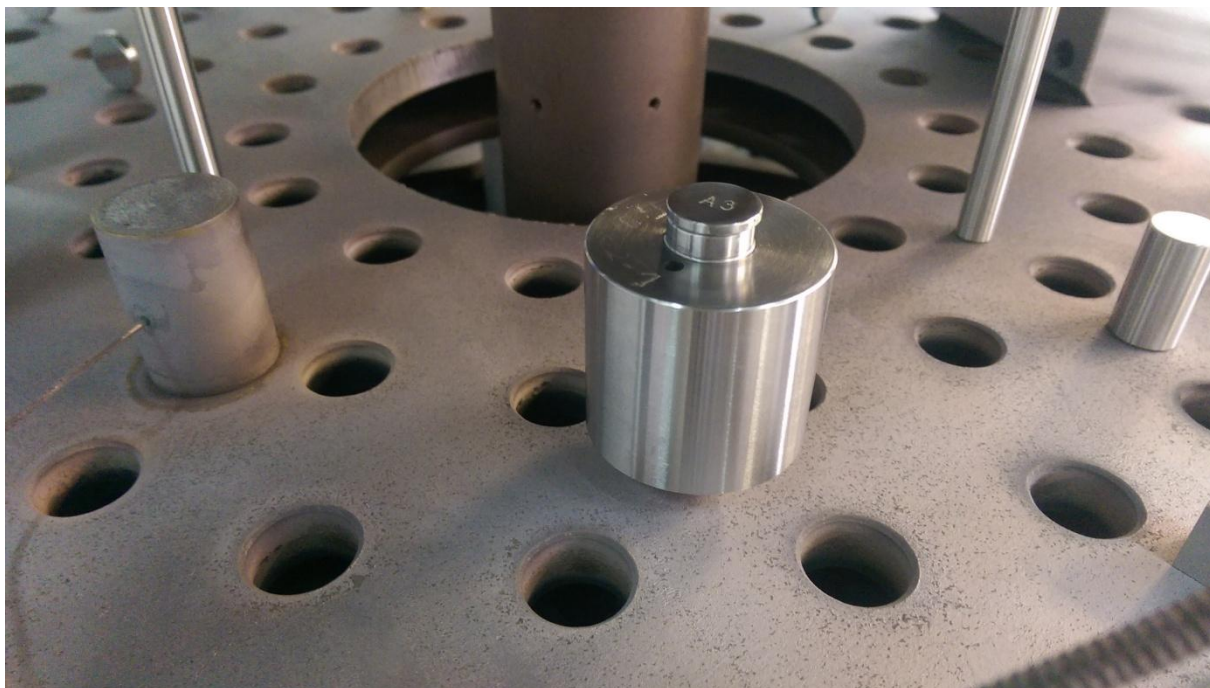
Upravljanjem putem PLC-a osigurati će se kontinuiranost uvjeta (brzina ugrijavanja, temperatura ugrijavanja, temperatura hlađenja, vrijeme ugrijavanja, vrijeme hlađenja) tokom cijele simulacije toplinskog umora. Dimenzije uzoraka dane su na Slici 32. Rupe $\Phi 3,4$ mm na donjoj površini uzorka omogućuju povezivanje i okretanje uzorka sa okrećućim sklopom uređaja.



Slika 32. Dimenzije uzoraka



Slika 33. Ispitna oprema

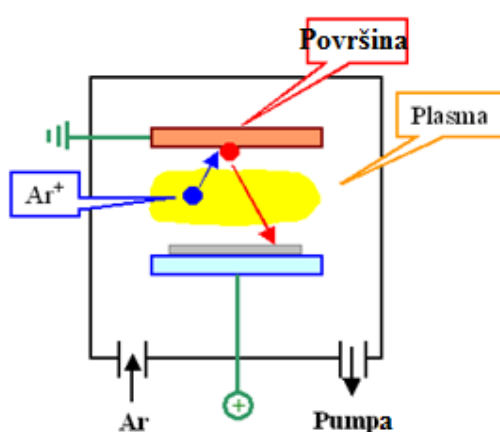


Slika 34. Uzorak A3



Slika 35. Uzorak u prihvatu uređaja

Uzorci su nakon osnovne toplinske obrade fino brušeni brusnim papirom gradijacije 320, 600 i 1000, a nakon finog brušenja čišćeni tzv. „sputtering“ postupkom koji utječe na hrapavost kasnije nanesenih prevlaka. Osnovni princip (Slika 36.) na kojim se čisti površina tzv. sputtering je izbijanje atoma površine pomoću ioniziranih čestica visoke energije unutar reakcijske komore PAVCD uređaja.



Slika 36. Sputtering metoda [19]

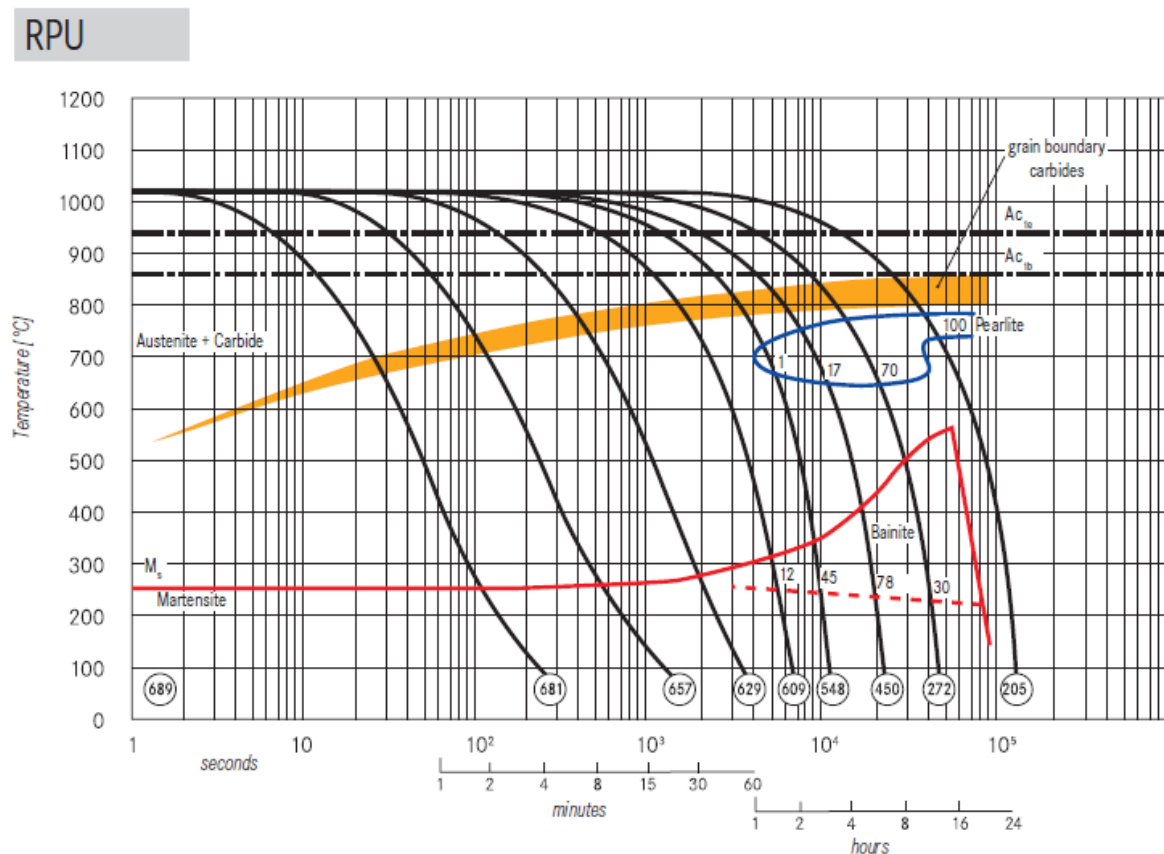
8.2 Materijal i toplinske obrade uzoraka

8.2.1 Materijal

Materijal kalupa je čelik X38CrMoV5-3 sa kemijskim sastavom prema Tablici 8. spada u visokolegirane alatne čelike za rad u toplom stanju te se općenito primjenjuje za izradu kalupa kod tlačnog lijevanja lakih metala i neželjeznih legura. Glavno je svojstvo istog čelika visoka čvrstoća i žilavost pri povišenim temperaturama. Pogodan je za sve postupke nitriranja što rezultira visokom površinskom tvrdoćom te povišenim otporom na erozijsko trošenje.

Tablica 8. Kemijski sastav alatnog čelika X38CrMoV5-3 [20]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,38 %	0,4 %	0,4 %	5,0 %	2,8 %	0,6 %



Slika 37. TTT dijagram ispitnog čelika X38CrMoV5-3 [20]

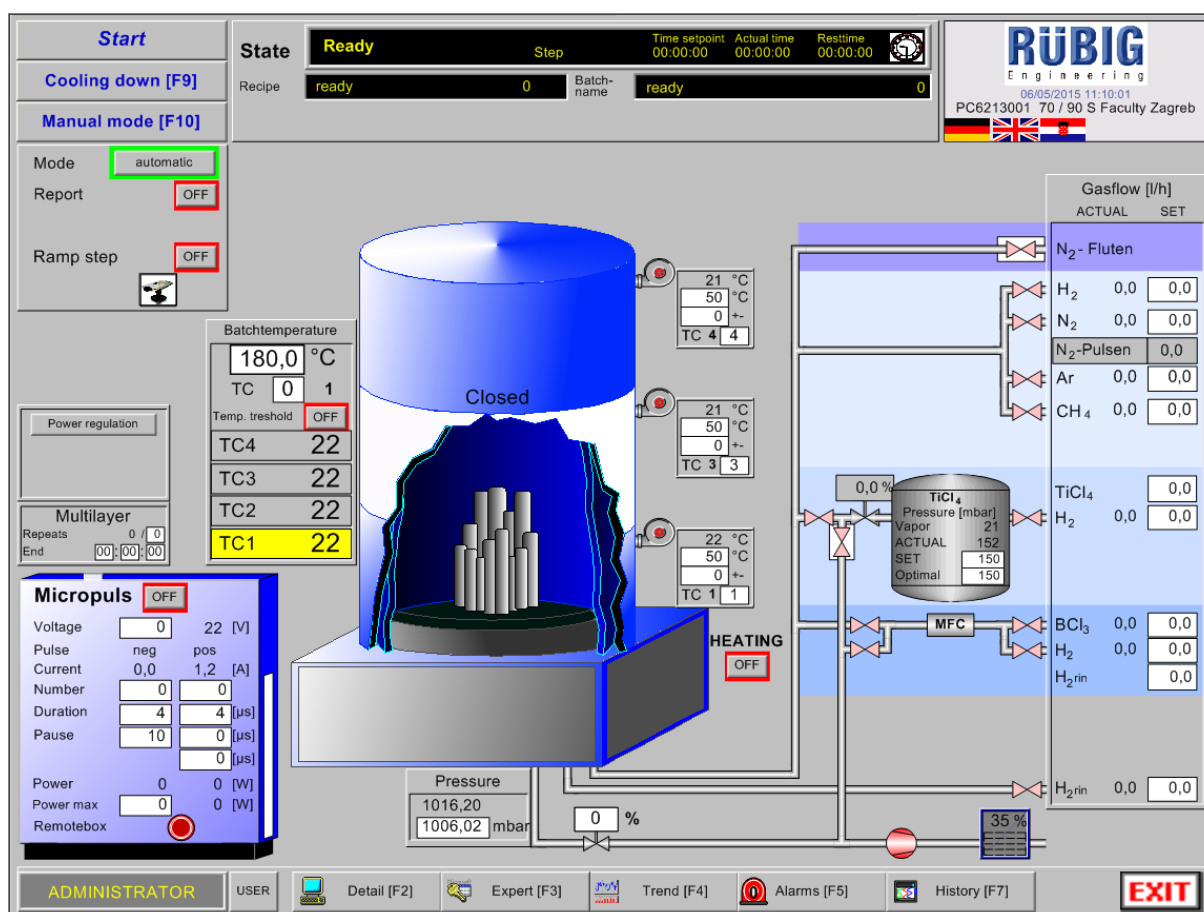
8.2.2 Toplinske obrade uzoraka

Kao što je ranije rečeno, nad uzorcima A0-A3 provedena identična toplinska obrada, uz iste parametre te u isto vrijeme. Uzorci obrađeni samo konvencionalnom toplinskom obradom biti će kontrolni s kojima će se uspoređivati svojstva novo razvijenih površinskih slojeva. Parametri toplinske obrade te postupaka modificiranja i prevlačenja prevedeni na pojedinim uzorcima definirani su u Tablici 9.

Tablica 9. Parametri toplinske obrade i prevlačenja

Uzorak	Osnovna toplinska obrada	Plazmatski nitrirano	PACVD prevlačenje TiN i TiCN prevlakama	PACVD prevlačenje TiBN (TiN/TiB ₂ multilayer) prevlakama
A0	$\vartheta_a = 1060^\circ\text{C}$ 1. $\vartheta_p = 620^\circ\text{C}$ 2. $\vartheta_p = 570^\circ\text{C}$	/	/	/
A1	$\vartheta_a = 1060^\circ\text{C}$ 1. $\vartheta_p = 620^\circ\text{C}$ 2. $\vartheta_p = 570^\circ\text{C}$	500°C / 6h 5% N ₂	/	/
A2	$\vartheta_a = 1060^\circ\text{C}$ 1. $\vartheta_p = 620^\circ\text{C}$ 2. $\vartheta_p = 570^\circ\text{C}$	6h nitrirano sa 5% N ₂	1,5 h TiN + 0,5h prijelaz + TiCN prevlaka	/
A3	$\vartheta_a = 1060^\circ\text{C}$ 1. $\vartheta_p = 620^\circ\text{C}$ 2. $\vartheta_p = 570^\circ\text{C}$	nitriranje 500°C/6h sa 5% N ₂	TiN/2h	TiBN (43 sloja TiN – TiB ₂) /7,5h

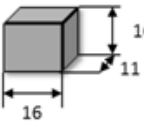
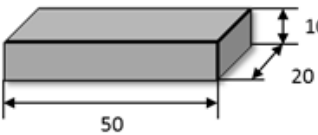
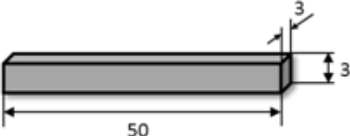
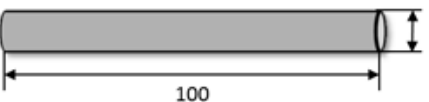
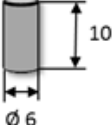
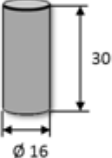
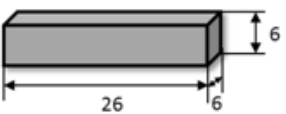
Osnovna toplinska obrada ista je za sve uzorke. Provedena je sa ciljem povišenja tvrdoće i čvrstoće površinskog sloja kalupa te kao baza za daljnje toplinske obrade. Nakon osnovne toplinske obrade kaljenja, uzorci su nitrirani u plazmatskoj atmosferi jer nitrirani površinski sloj povećava, uz tvrdoću, i prionjivost prevlaka te smanjuje koeficijent kontaktnog trenja prevlaka. Uzorak A2 prevučen je TiN i TiCN prevlakom, dok je uzorak A3 je prevučen višeslojnom prevlakom TiBN gdje su naizmjenično poredani slojevi TiN i TiB₂. Dobivena su 43 sloja različitih debljina. Naime, povećavanjem koncentracije dušika i smanjenja bora u reakcijskoj komori kod formiranja dobivani su sve tanji slojevi TiB₂ i sve deblji slojevi TiN. Završni sloj TiB₂ najmanje je debljine. Koncentracije reaktivnih plinova u komori određuju se preko sučelja upravljanja uređajem prema Slici 38.



Slika 38. Sučelje Rübzig PACVD uređaja

8.3 Ispitivanje tvrdoće nakon osnovne toplinske obrade

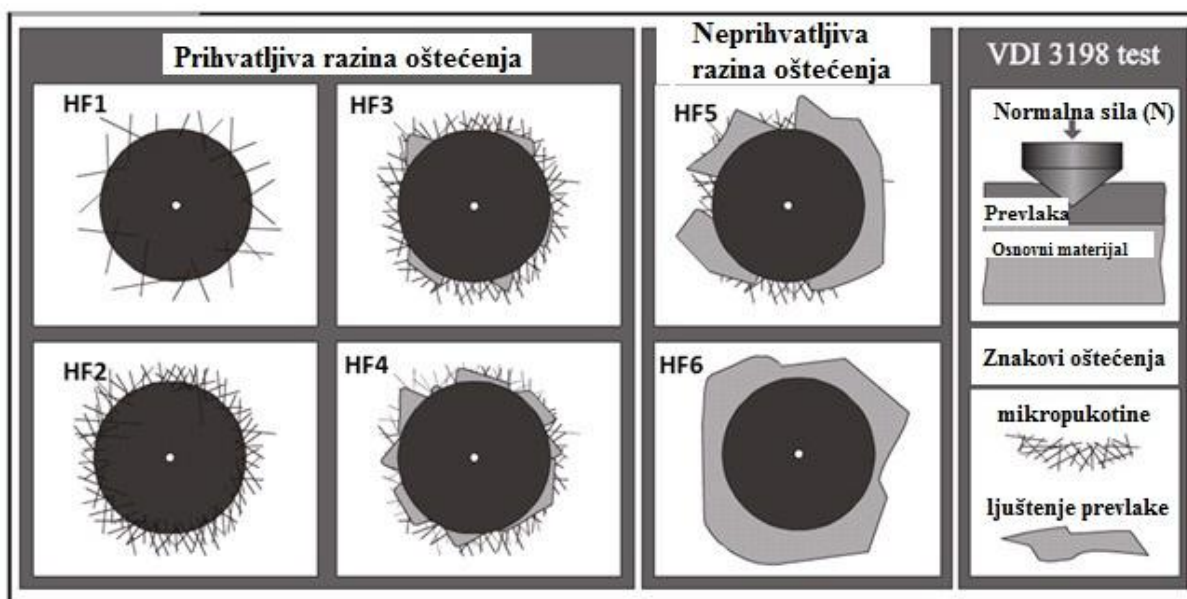
Provedena su ispitivanja tvrdoće nakon osnovne toplinske obrade HRC metodom te su dobiveni rezultati prema Slici 39. Prosječna vrijednost od 44,44 HRC nakon drugog popuštanja uzoraka pri 570 °C predstavlja dobru bazu za tvrde prevlake.

Uzorci: A0, A1, A2, A3	Materijal: X38CrMoV5-3 1.2367 (KIND&Co. RPU-ESR)	$\vartheta_s=1060^{\circ}\text{C}$ 1. $\vartheta_p=620^{\circ}\text{C}$ 2. $\vartheta_p=570^{\circ}\text{C}$
Uzorak	Tvrdoća HRC	
	45,2	
	44,7	
	44,7	
	43	
	44,5	
	44,5	
	44,5	
44,44		

Slika 39. Rezultati ispitivanja tvrdoće nakon osnovne toplinske obrade

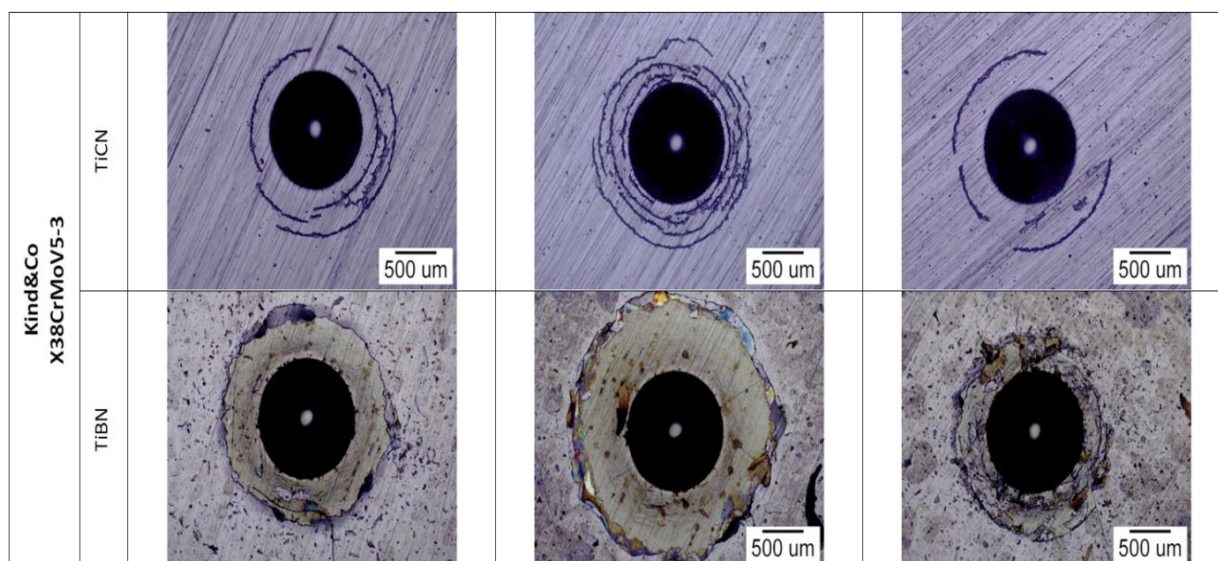
8.4 Ispitivanje prionjivosti

Ispitivanje prionjivosti odvija se prema HRC metodi na način da se u površinu prevlake utiskuje dijamantni stožac normalnom silom N te se naknadnim snimanjem svjetlosnim mikroskopom procjenjuju oštećenja (mikropukotine i delaminacija prevlake) oko otiska. HF1 razred predstavlja najbolju prionjivost prevlake, dok HF6 razred predstavlja najlošiju prionjivost prevlake. Naime prodiranjem dijamantnog identora dolazi do mikropukotina prevlake što predstavlja zadovoljavajuća oštećenja, ali nikako nije prihvatljivo ljuštenje (delaminacija) površinskog sloja prevlake od osnovnog materijala. Upravo iz tog razloga razred HF5 i HF6 predstavlja lošu prionjivost prevlake. Difuzijom elemenata prevlake u materijal baze stvara se kompaktni sloj visoke kvalitete i zadovoljavajućih svojstava prionjivosti.



Slika 40. HRC metoda ispitivanja prionjivost prevlaka [21]

Prema istoj metodi ispitane su TiC i TiBN prevlake, a rezultati snimljeni svjetlosnim mikroskopom prikazani na Slici 41. pokazuju zadovoljavajuću prionjivost svih slojeva prevlaka.



Slika 41. Rezultati ispitivanja prionjivosti HRC metodom

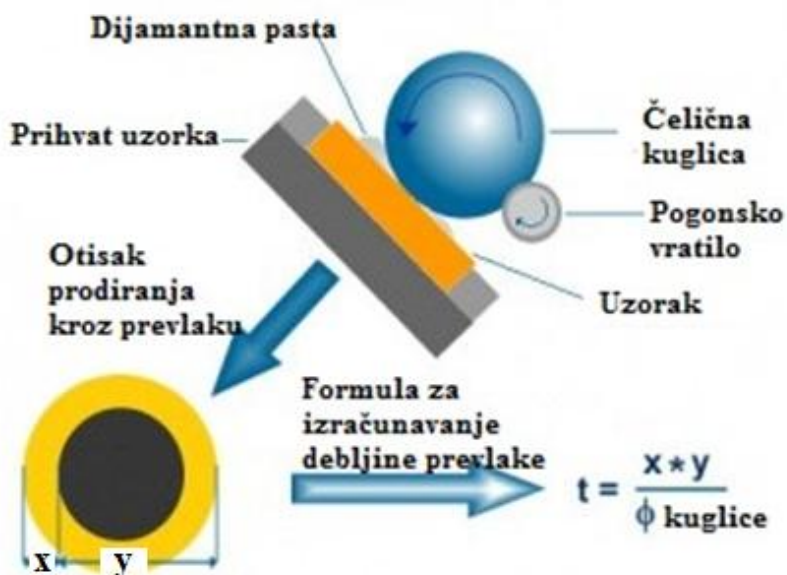
8.5 Debljina prevlaka

Debljina prevlaka mjerena je pomoću uređaja Calotester kojim je moguće brzo izmjeriti debljinu svih tvrdih prevlaka. Slika 42. prikazuje uređaj Calotester.



Slika 42. Calotester [22]

Princip rada je da se pomoću kuglice i abrazivne dijamantne paste prodre do osnovnog materijala preko prevlake te se svjetlosnim mikroskopom mjere dimenzije otiska, a debljina prevlake dobiva se računski preko karakterističnih mjera prema Slici 43.



Slika 43. Princip rada Calotestera [23]

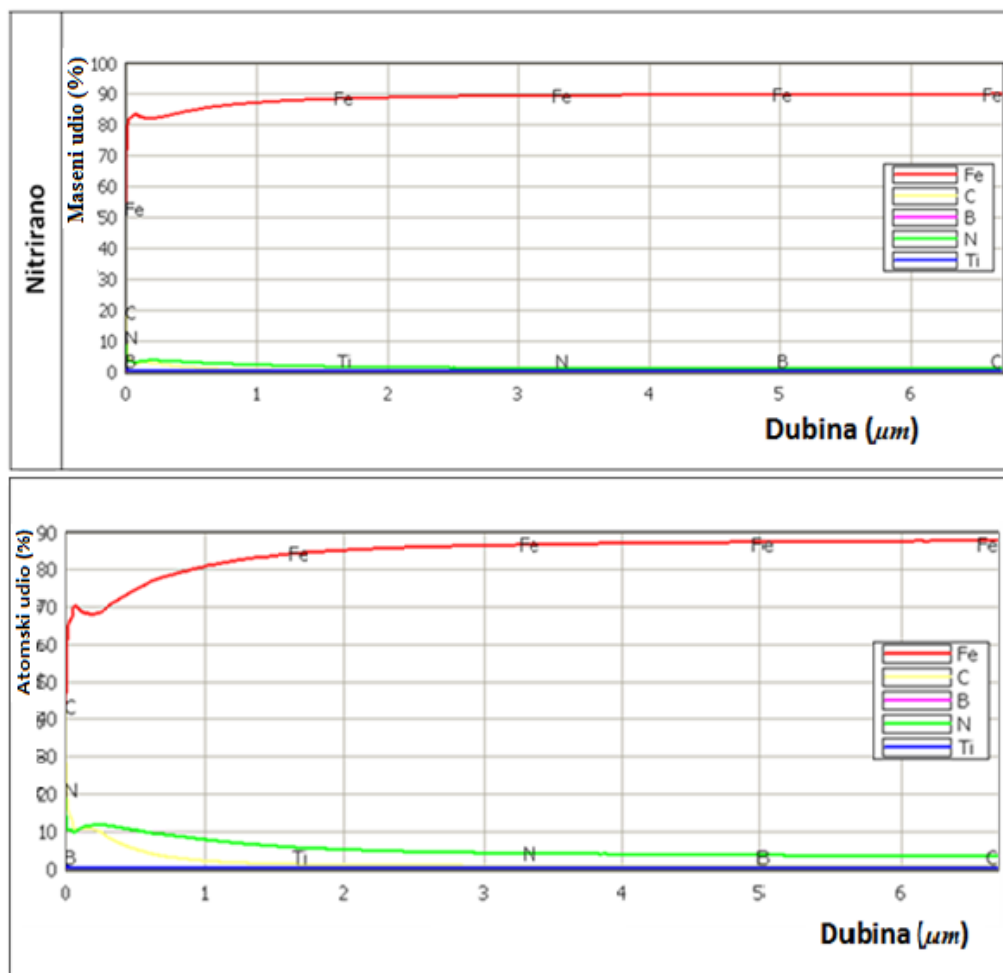
Rezultati mjerenja prikazani su u Tablici 10.

Tablica 10. Debljine prevlaka

A2			
	X [μm]	Y [μm]	Debljina prevlake
1	126	658	3,32
2	156	573	3,58
3	233	543	5,06
4			
			3,98
A3			
	X [μm]	Y [μm]	Debljina prevlake
1	132	739	3,90
2	86	766	2,64
3	87	767	2,67
4	144	772	4,45
			3,41

8.6 GDS Kemijska analiza površinskog sloja

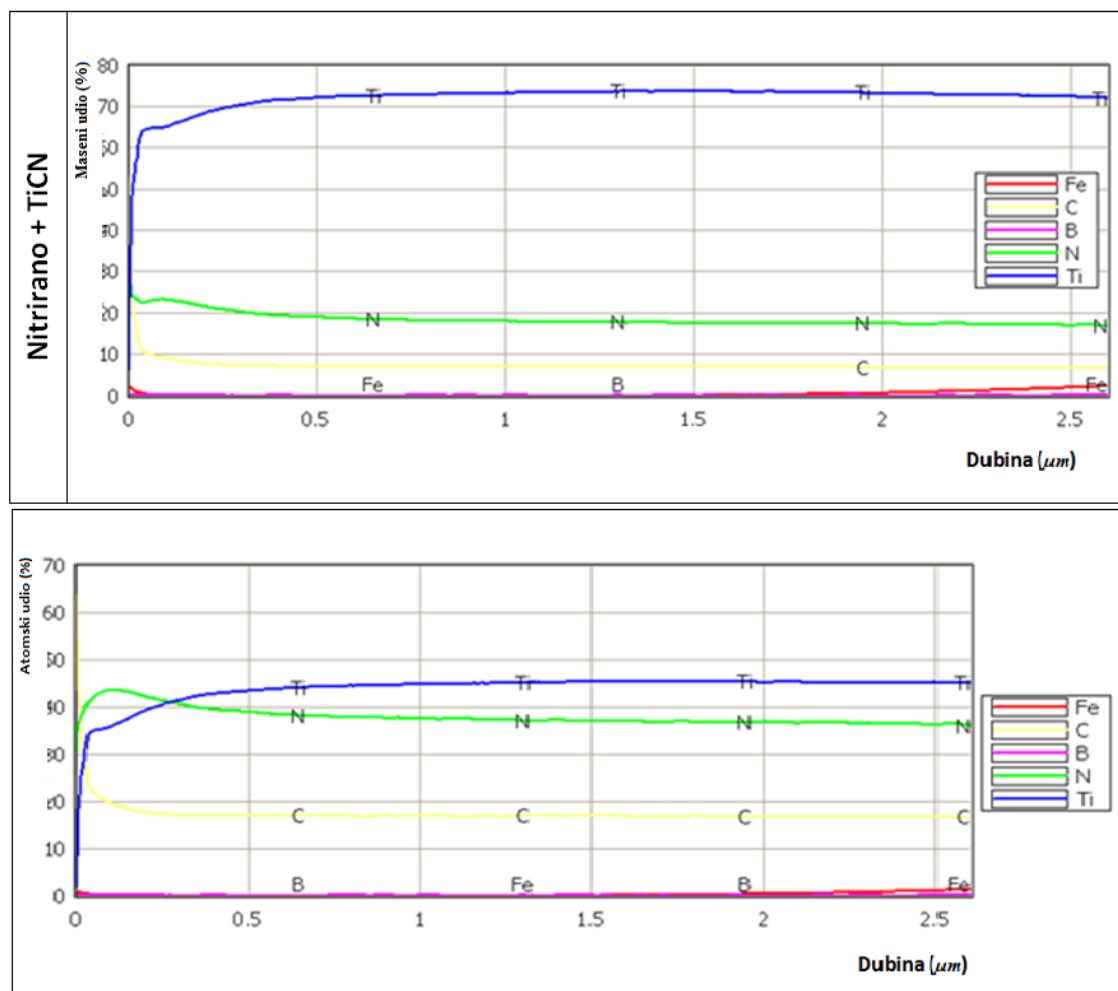
Kemijski sastav površinskog sloja uzoraka dobiven je pomoću metode optičke emisije spektrometrije, na GDS uređaju za spektrometriju. Princip rada ovog uređaja da se atomi ispitivanog uzorka pobuđuju energijom koju u obliku iskre izbacuje elektroda iznad uzorka. Energija iskre uzrokuje da elektroni koji se nalaze u atomima pojedinih elementa emitiraju svjetlost koja se pomoću pretvarača pretvara u određeni svjetlosni spektar. Svaki pojedini intenzitet određenog spektra određuje drugi kemijski element. Mjerenjem intenziteta vrhova u dobivenom spektru moguće je dobiti vrlo visoku točnost kvantitativne ili kvalitativne analize. Prema kemijskom sastavu površinskog sloja može se zaključiti i o debljini prevlake jer manji udio elemenata prevlake na određenoj dubini direktno znači da je na istoj dubini samo osnovni materijal.



Slika 44. GDS snimka nitrirane površine

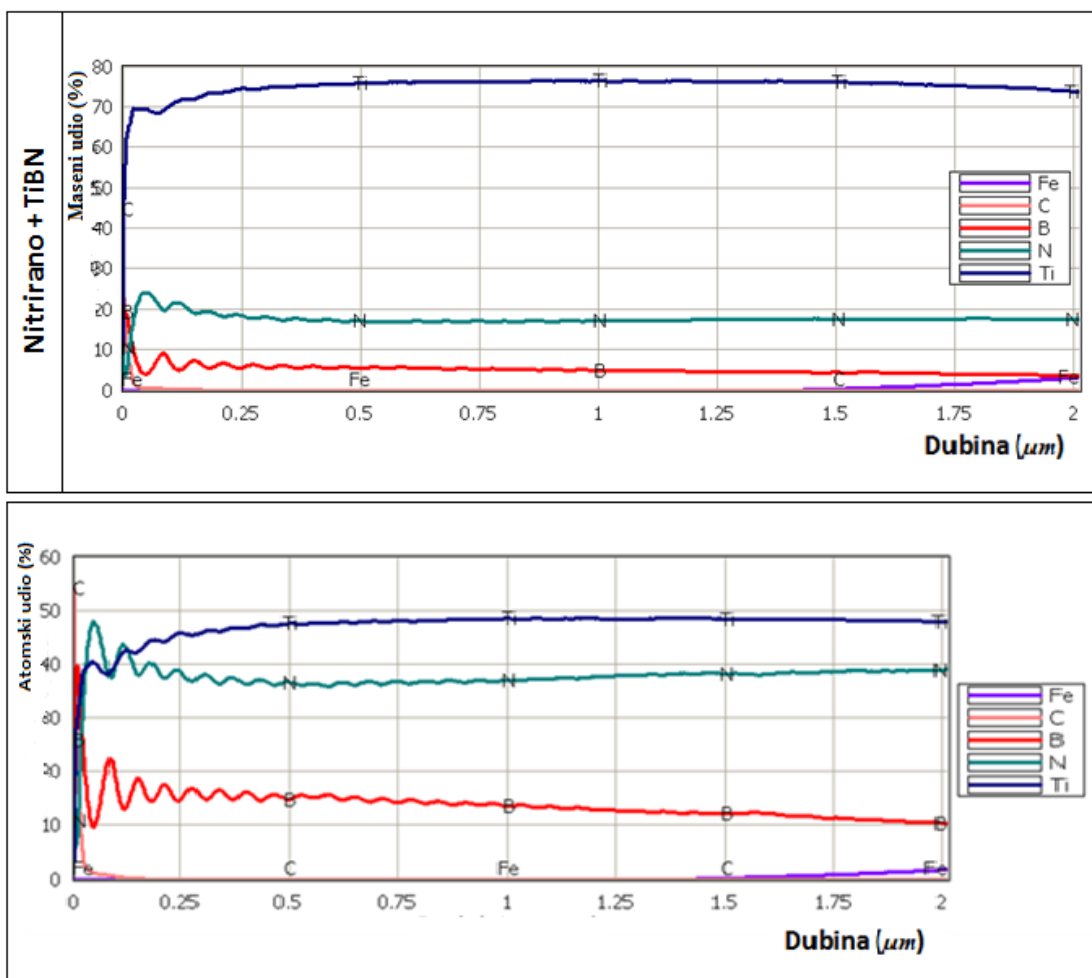
Prema Slici 44. vidi se da udio dušika od površine prema jezgri pada što je i karakteristično za postupak površinskog modificiranja površine nitriranjem.

Visok udio titana, dušika i ugljika u površinskom sloju prema Slici 45. prikazuje da je stvorena prevlaka TiCN dubine veće od 2,5 μm jer se tek nakon 2,5 μm počinje pojavljivati željezo kao glavni element alatnog čelika.



Slika 45. GDS snimka nitrirane + TiCN površinske prevlake

Nakon provedenog nitriranja uzorak na uzorak A3 nanescena je višeslojna prevlaka TiBN što je vidljivo i na Slici 46. gdje su maseni i atomski udjeli titana, bora i dušika vrlo visoki. Željezo se počinje pojavljivati tek na dubini od 1.7 μm što može predstavljati granicu prevlake i materijala alatnog čelika.

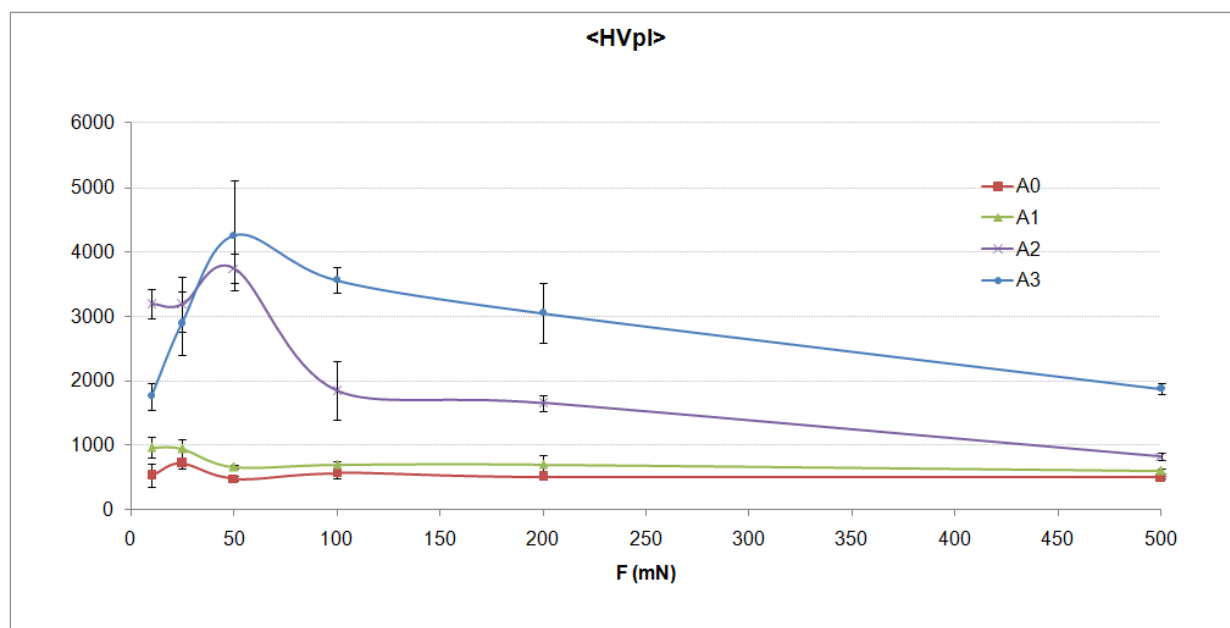


Slika 46. GDS snimka nitrirane + TiBN površinske prevlake

8.7 Ispitivanje tvrdoće prevlaka

Ispitivanje tvrdoće prevlaka predstavlja određenu problematiku te rezultati mjerenja ovise o nekoliko faktora. Dubina prodiranja indentora treba biti manja od 1/10 debljine prevlake te za oko 20 veća od površinske hrapavosti. Kod ispitivanja tvrdoće prevlake ne smije se prodrti do materijala jezgre jer ne postoji direktna formula za mjerenje tvrdoće u tom slučaju. U našem slučaju uzorci nisu zadovoljili spomenute uvjete pri svim silama ispitivanja te su dobiveni rezultati na Slici 47. samo kvalitativne i komparativne prirode.

Ista mjerenja mogu biti točnija i pouzdanija uz prethodno poliranje uzoraka, ali nikako kvantitativno točna s obzirom da se poliranjem smanjuje debljina prevlake.

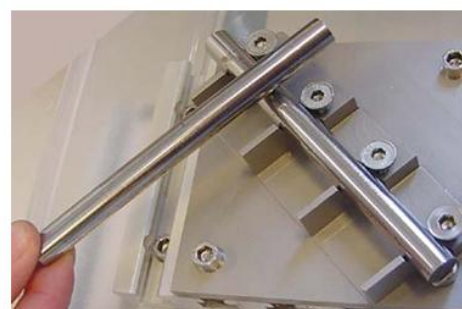


Slika 47. Sumirani rezultati ispitivanja tvrdoće uzoraka

Razlike u mjerenjima od 1000 HV za uzorak A3 nisu zanemariva, a pad tvrdoće povećanjem sile ispitivanja kod uzoraka A2 i A3 ukazuje na prodiranje prevlake do osnovnog materijala puno manje tvrdoće.

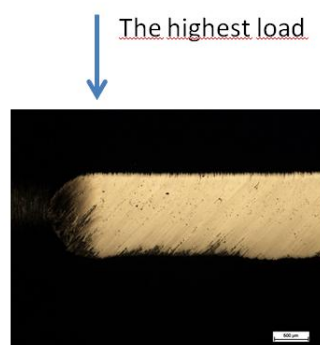
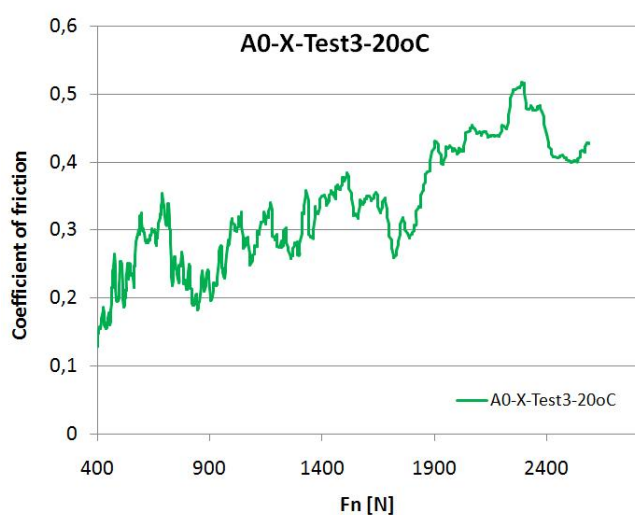
8.8 Ispitivanje faktora trenja pri temperaturama od 20 i 500 °C

Ispitivanje faktora trenja provedeno je ispitnom opremom na Slici 48. Mjeri se faktor suhog trenja između dva kotrljajuća valjka uz povećanje normalne sile od 400 N do 2400 N. Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi i na temperaturi od 500 °C.

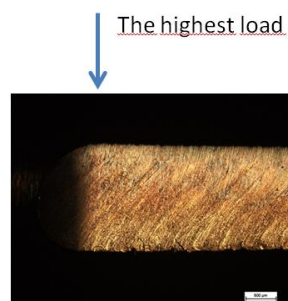
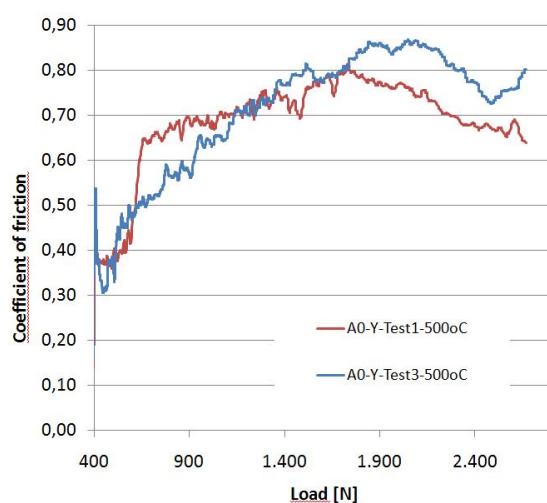


Slika 48. Ispitna oprema za određivanje faktora trenja

Uzorak A0 pokazuje nestabilan koeficijent trenja kod obje temperature ispitivanja, a prema reljefu površine vidljivo je da dolazi do plastične deformacije i do jakog trošenja površine.



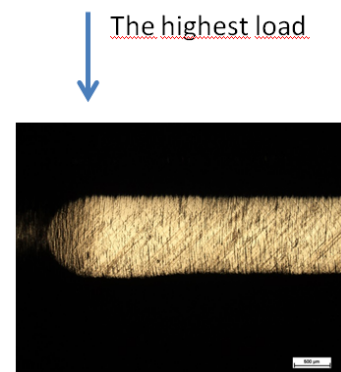
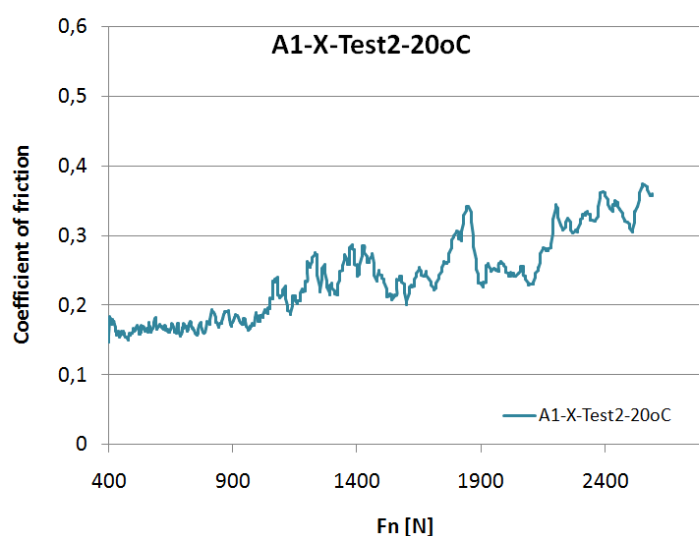
a)



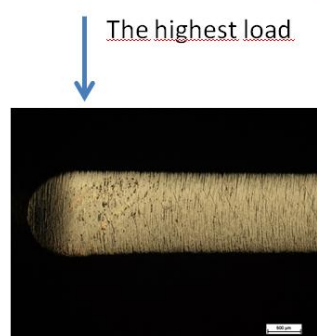
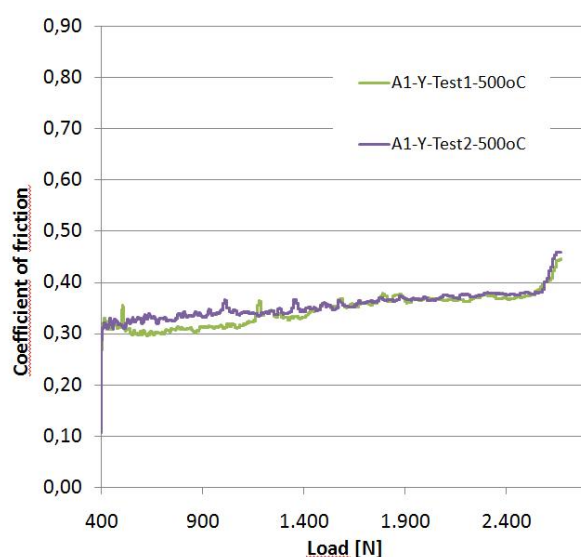
b)

Slika 49. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A0

Uzorak A1 pokazuje stabilnost koeficijenta trenja i manju plastičnu deformaciju do 1000 N pri temperaturi od 20 °C, dok je kod 500 °C koeficijent trenja prilično stabilan i sveukupno uzorak A1 karakterizira općenito manje trošenje i plastična deformacija.



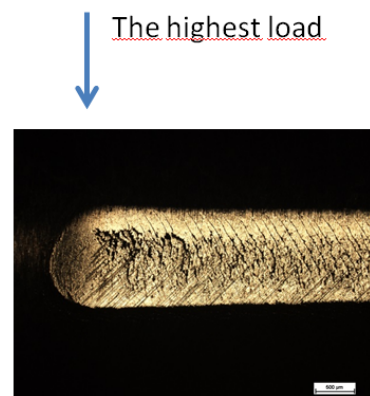
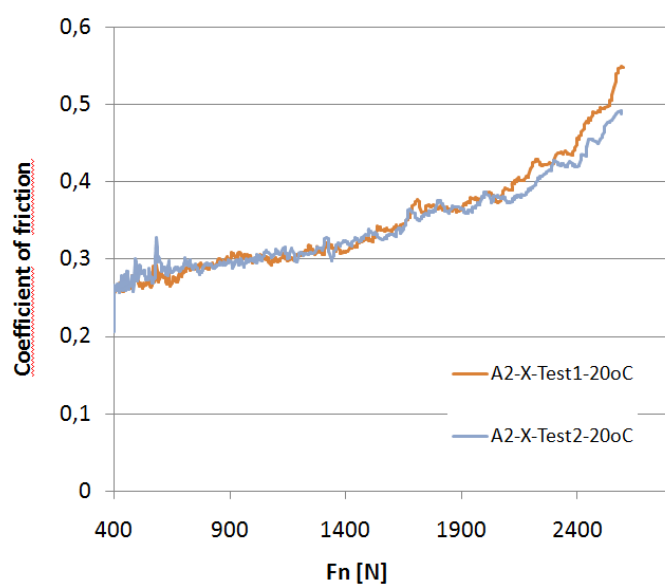
a)



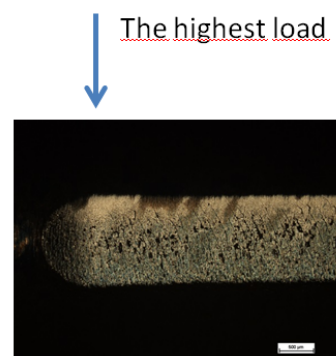
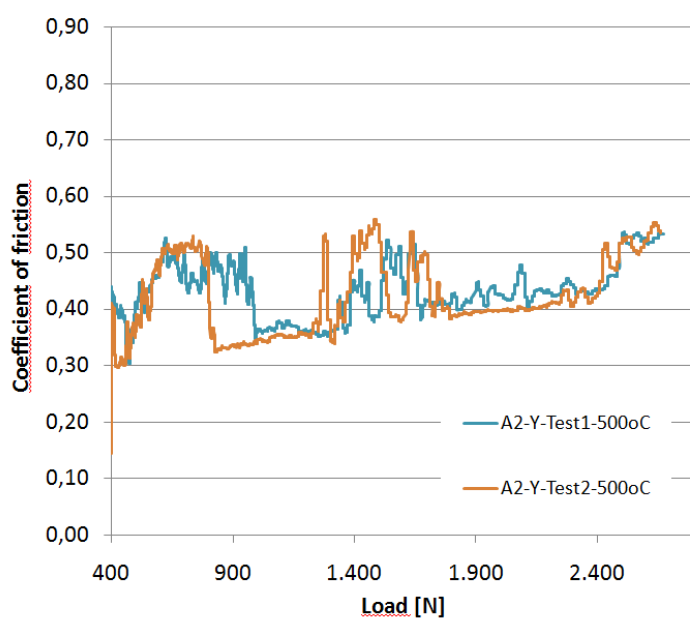
b)

Slika 50. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A1

Uzorak A2 karakterizira stabilan koeficijent trenja pri temperaturi od 20 °C, dolazi do pukotina, no ne i do delaminacije prevlake. Ne dolazi do plastične defomacije što predstavlja manja oštećenja u usporedbi sa A0 i A1 uzorcima. Pri 500 °C koeficijent je relativno nestabilan što može biti rezultat prirode tribološkog ponašanja adhezijskog prijelaznog sloja.



a)

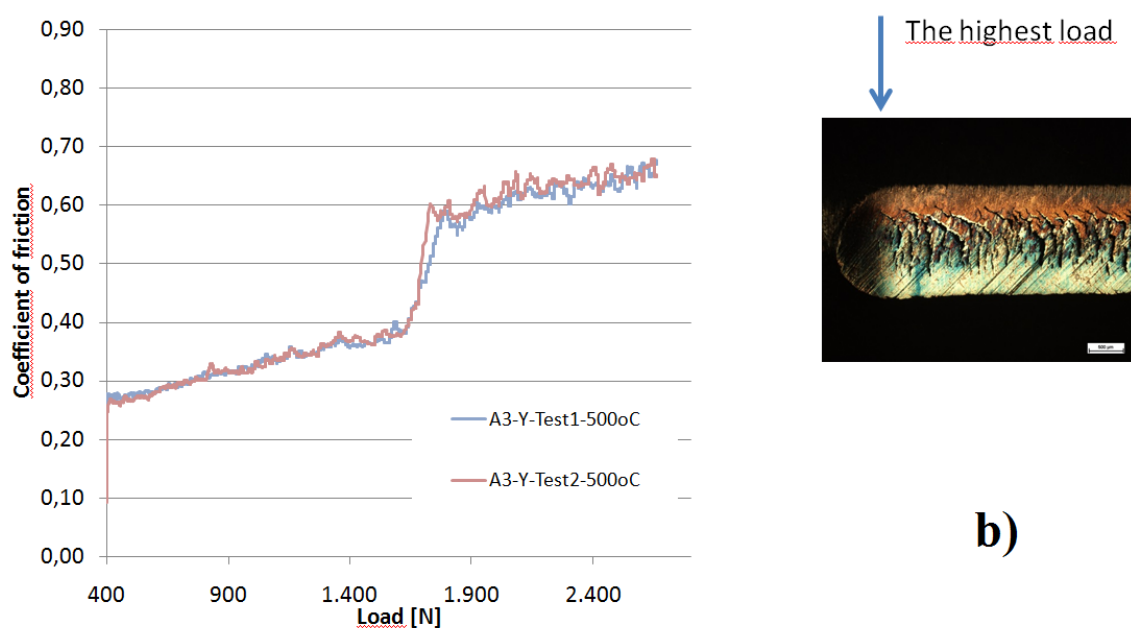
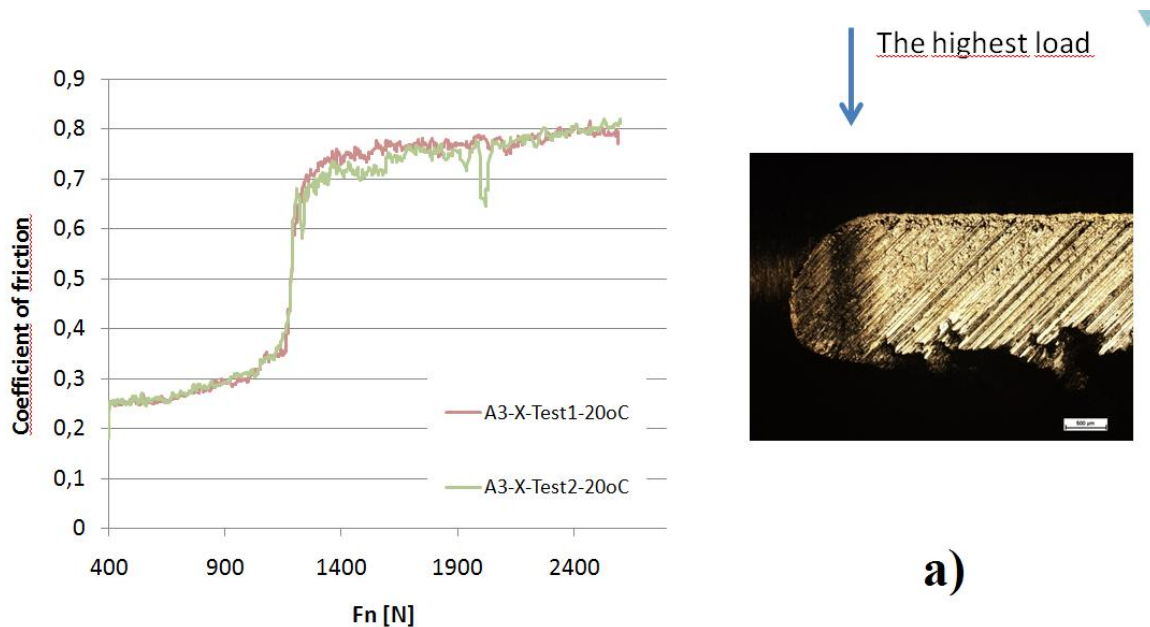


b)

10

Slika 51. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A2

Uzorak A3 pokazuje isto ponašanje koeficijenta trenja na obje temperature, a razlika je samo u kritičnoj kontaktnoj sili kod koje dolazi do pucanja prevlake i jasnog povećanja faktora trenja. U odnosu na prethodne uzorke pokazuje najmanje trošenje.



1

Slika 52. Faktor trenja u ovisnosti o normalnoj sili pri : a) 20 °C, b) 500 °C za uzorak A3

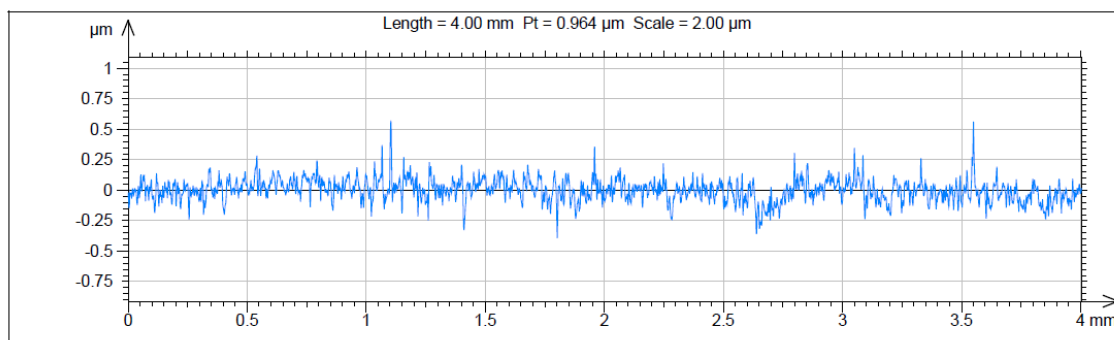
8.9 Ispitivanje hrapavosti

Ispitivanje površinske hrapavosti snimanjem profila površina prevlake ima važnu ulogu u odluci o optimalnosti prevlake za prevlačenje kalupa kod tlačnog lijevanja. Mjerenje hrapavosti površine rađeno je s ciljem provjere da li je došlo do promjene hrapavosti površine nakon plazmatskog nitriranja, nakon prevlačenja TiCN i nakon prevlačenja TiBN. Sam proces formiranja nitriranog sloja i slojeva prevlake utječe na hrapavost površine, a ovisan je i o prethodnoj hrapavosti površine. Nad uzorcima koji su nakon kaljenja bušeni brusnim papirom i čišćeni tzv. „sputtering“ postupkom u plazmatskoj komori provedena su tri mjerenja i dobiveni rezultati prema Tablici 11. Iz profila prevlake moguće je zaključiti o djelovanju faktora dinamičkog trenja te o međudjelovanju taline i površine kalupa.

Tablica 11. Srednja površinska hrapavost uzoraka

Uzorak	Ra (μm)	Ra (μm)
A0	47	54
	66	
	49	
A1	53	49
	58	
	37	
A2	42	46
	47	
	49	
A3	37	50
	52	
	60	

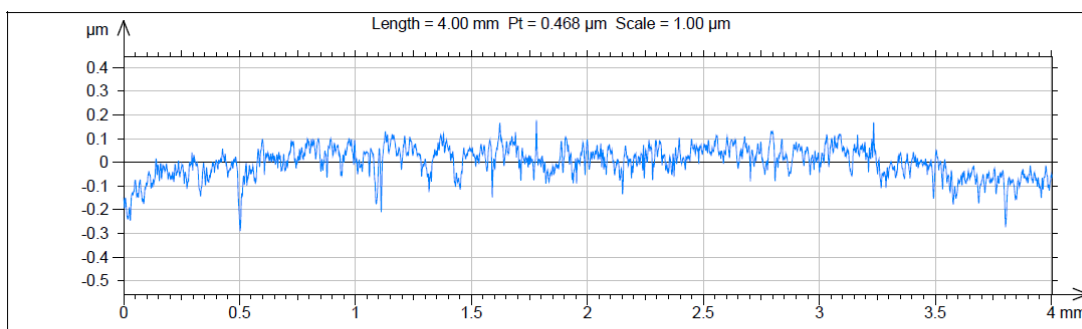
Nekoliko primjera snimanja prikazuju Slike 53-56.



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	0.451	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	0.299	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	0.749	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.0659	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rq	0.0885	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rsk	0.313		Gaussian filter, 0.8 mm
Rku	6.23		Gaussian filter, 0.8 mm

Identity card	
Name:	A0 (2)
Axis: X	
Length:	5.00 mm
Size:	17999 points
Spacing:	0.278 μm
Offset:	0.000555 mm
Axis: Z	
Length:	3.50 μm
Z min:	-3.26 μm
Z max:	0.241 μm
Size:	9972807 digits
Spacing:	0.000351 nm

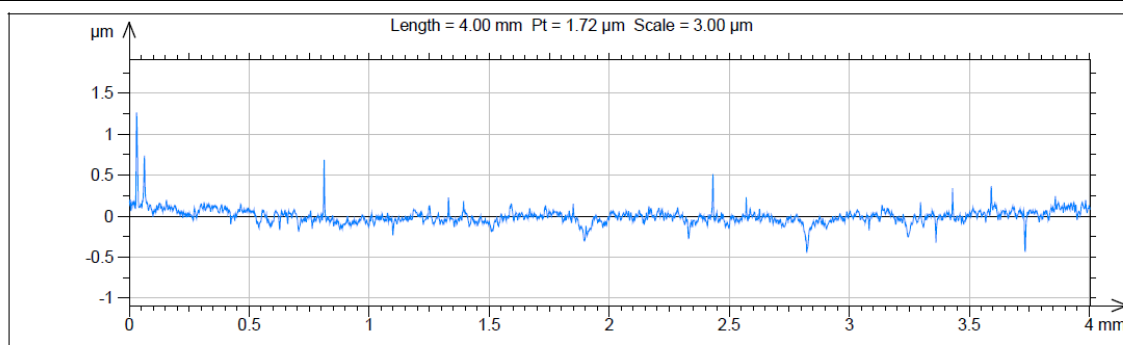
Slika 53. Površinska hrapavost uzorka A0



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	0.128	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	0.179	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	0.307	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.037	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rq	0.0479	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rsk	-0.644		Gaussian filter, 0.8 mm
Rku	4.02		Gaussian filter, 0.8 mm

Identity card	
Name:	A1 (3)
Axis: X	
Length:	5.00 mm
Size:	17999 points
Spacing:	0.278 μm
Offset:	0.000555 mm
Axis: Z	
Length:	3.92 μm
Z min:	-3.86 μm
Z max:	0.0581 μm
Size:	9987860 digits
Spacing:	0.000393 nm

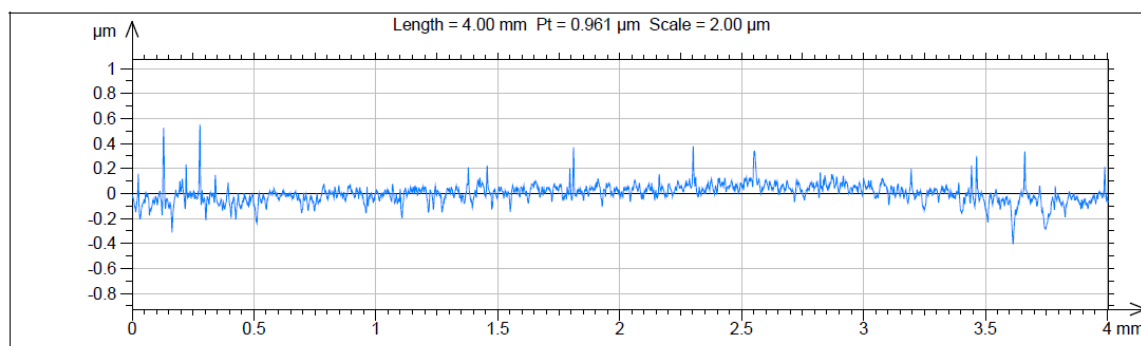
Slika 54. Površinska hrapavost uzorka A1



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	0.463	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	0.278	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	0.742	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.0468	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rq	0.0684	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rsk	0.831		Gaussian filter, 0.8 mm
Rku	16.1		Gaussian filter, 0.8 mm

Identity card	
Name:	A2 (2)
Axis: X	
Length:	5.00 mm
Size:	17999 points
Spacing:	0.278 μm
Offset:	0.000555 mm
Axis: Z	
Length:	4.64 μm
Z min:	-3.9 μm
Z max:	0.747 μm
Size:	9939712 digits
Spacing:	0.000467 nm

Slika 55. Površinska hrapavost uzorka A2



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	0.278	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	0.168	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	0.446	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.0371	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rq	0.052	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rsk	0.613		Gaussian filter, 0.8 mm
Rku	8.62		Gaussian filter, 0.8 mm

Identity card	
Name:	A3 (1)
Axis: X	
Length:	5.00 mm
Size:	17999 points
Spacing:	0.278 μm
Offset:	0.000555 mm
Axis: Z	
Length:	1.44 μm
Z min:	-0.926 μm
Z max:	0.519 μm
Size:	9894927 digits
Spacing:	0.000146 nm

Slika 56. Površinska hrapavost uzorka A3

9. Zaključak

Odljevci proizvedeni tlačnim lijevom spadaju „near net shape“ proizvode visoke dimenzijske točnosti i kvalitete površine. U okviru rada opisana je pojava toplinskog umora alatnog čelika za topli rad koji je najčešće korišteni materijal za izradu kalupa. Toplinski umor dominantni je mehanizam dotrajavanja koji svojim djelovanjem značajno utječe na trajnost kalupa. Iz istog razloga u radu su razrađeni postupci toplinske obrade i naknadnog prevlačenja koji znatno povećavaju otpornost kalupnog materijala na toplinski umor. Prema literaturnim podacima pokazano je da povišena površinska tvrdoća jedno od najvažnijih svojstava materijala koja pružaju optimalnu otpornost na toplinski umor. U eksperimentalnom dijelu rada ispitivana su svojstva površinskih slojeva uzoraka od X38CrMoV5-3, alatnog čelika za topli rad. Ispitivana su četiri uzorka (A0-A3) nad kojima je provedena ista osnovna toplinska obrada. Uzorak A0 obrađen samo konvencionalnom toplinskom obradom služio je kao kontrolni s kojim su uspoređivana svojstva novo razvijenih površinskih slojeva. Pokazano je da toplinska obrada modificiranja površinskog sloja plazma nitiranjem predstavlja dobru bazu za prevlake TiN i TiBN. Naime, plazma nitiranjem eliminira se stvaranje zone spojeva, već se stvara samo difuzijska zona koja čini čvrstu vezu osnovnog materijala i prevlake. Optimalnost se javlja u obliku smanjenog koeficijenta kontaktnog trenja, dobre prionjivosti te visoke površinske tvrdoće prevlaka. Površinska svojstva uzorka A3 na koji je nanescena višeslojna prevlaka TiBN (43 sloja TiN i TiB₂) najbolja su za primjenu kod tlačnog lijevanja zbog visoke površinske tvrdoće, dobre prionjivosti i stabilnog faktora trenja u ovisnosti o temperaturi što je i pokazano ispitivanjem. Problem je ukoliko dolazi do delaminacije prevlake gdje se dobra svojstva prevlake gube.

10. Literatura

- [1] <http://www.aludiecasting.com/>
- [2] Alan Kaye, Arthur Street: Die Casting Metallurgy, UK 1982.
- [3] B.Matijević, M. Stupnišek, I. Kranjčević: Modificiranje kalupa za tlačno lijevanje aluminija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [4] Edward J. Vinarcik: HIGH INTEGRITY DIE CASTING PROCESSES
- [5] Anders Persson , Sture Hogmark, Jens Bergström: Temperature profiles and conditions for thermal fatigue cracking in brass die casting dies, Journal of Materials Processing Technology 152 (2004) 228–236
- [6] Dhouha Mellouli , Nader Haddar, Alain Köster, Hassine Ferid Ayedi, Thermal fatigue failure of brass die-casting dies, Engineering Failure Analysis 20 (2012) 137–146
- [7] M. Muhič, J. Tušek, F. Kosel, D. Klobčar, M. Pleterski: Thermal fatigue cracking of die-casting dies, METABK 49 (1) 9-12 (2010)
- [8] David Schwam, John F. Wallace, Sebastian Birceanu: DIE MATERIALS FOR CRITICAL APPLICATIONS AND INCREASED PRODUCTION RATES, Case Western Reserve University, November 2002
- [9] Dhouha Mellouli, Nader Haddar, Alain Köster, Hassine Ferid Ayedi: Hardness effect on thermal fatigue damage of hot-working tool Steel, Engineering Failure Analysis 45 (2014) 85–95
- [10] F. Cajner: Postupci modificiranja i prevlačenja površina, nastavni materijali 2012./2013, Predmet “Toplinska obrada“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2012
- [11] Petar Ljumović: Analiza triboloških mehanizama trošenja na kulupima za visoko-tlačno lijevanje, Split 2013.
- [12] V. Joshi, A.Srivastava, R. Shivpuri, E. Rolinski: Investigating ion nitriding for the reduction of dissolution and soldering in die-casting shot sleeves, Surface and Coatings Technology 163 –164 (2003) 668–673
- [13] D. Heim, F. Holler , C. Mitterer: Hard coatings produced by PACVD applied to aluminium die casting, Surface and Coatings Technology 116–119 (1999) 530–536

- [14] Haman Hedaiatmofidi, Alireza Sabour Rouh Aghdam, Shahrokh Ahangarani, Mansour Bozorg, Mahboube Azadi, Maryam Valiei: Deposition of Titanium Layer on Steel Substrate Using PECVD Method: A Parametric Study, *Materials Sciences and Applications*, 2014, 5, 140-148
- [15] K.S. Klimek, A. Gebauer-Teichmann, P. Kaestner, K.-T. Rie: Duplex-PACVD coating of surfaces for die casting tools, *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 5628–5632
- [16] S. Jakovljević: Utjecaj dvostrukog prevlačenja na mehanička svojstva keramičkih prevlaka, *Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb*, 2007
- [17] M. Azadi, A. Sabour Rouhaghdam, S. Ahangarani, H. H. Mofidi: Mechanical behavior of TiN/TiC multilayer coatings fabricated by plasma assisted chemical vapor deposition on AISI H13 hot work tool steel, *Surface & Coatings Technology* (2014)
- [18] Birol Y., İslar D.: Response to thermal cycling of CAPVD (Al,Cr)N-coated hot work tool steel, *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 8402– 8409
- [19] http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_6/backbone/r6_4_1.html
- [20] <http://www.kind-co.de/>
- [21] http://platit.com.hk/en_Newsroom_Detail.asp?id=1028
- [22] <http://tribotechnic.com/contenu.php?page=calotest>
- [23] <https://www.pvd-coatings.co.uk/pvd-coating-technology/testing-equipment/coating-thickness-tester/>

PRILOZI

I. CD-R disc